

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Omgivningspåverkan vid pål- och spontslagning

STAFFAN HINTZE

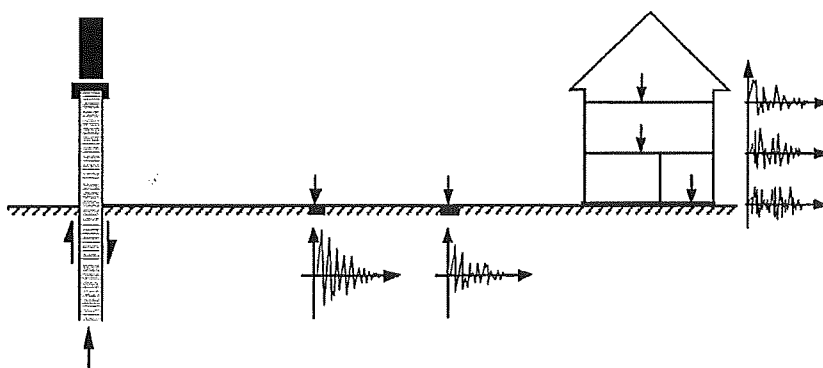
SVEN LIEBERG

RAINER MASSARSCH

MAGNUS HANSON / HANS ELVHAMMAR

BJÖRN LUNDAHL

SVEN-ERIK REHNMAN



Linköping 1997

rapport 95

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

rapport 95

Omgivningspåverkan vid pål- och spontslagning

STAFFAN HINTZE
SVEN LIEBERG
RAINER MASSARSCH
MAGNUS HANSON / HANS ELVHAMMAR
BJÖRN LUNDAHL
SVEN-ERIK REHNMAN

Rapport	Pålkommisionen 581 93 Linköping
Beställning	Statens geotekniska institut Biblioteket Tel: 013-20 18 04 Fax: 013-20 19 14 e-post: info@geotek.se internet: http://www.sgi.geotek.se
ISSN	0347-1047
ISRN	IVA/PAL/R--97/95--SE
Redigering och layout	Statens geotekniska institut
Upplaga	400 ex
Tryck	Roland Offset AB, Linköping, april 1997

Förord

Arbetet med denna rapport har skett under tiden 1992 till 1996. Huvudansvaret för gruppens arbete har vilat på IVA:s Pålkommision. Finansiärer har varit IVA:s Pålkommision, Svenska Byggbranchens Utvecklingsfond (SBUF), Pålentreprenörföreningen (PEF) samt Byggeforskningsrådet (BFR).

Målsättningen med arbetet har varit att beskriva omgivningspåverkan vid slagning av massförträngande pålar och spont. Tyngdpunkten för projektet har utgått från litteraturstudier. Svenska och utländska erfarenheter har jämförts och diskuterats. Följande punkter sammanfattar projektets målsättning:

- ge ett underlag för val av lämplig typ av påle/spont och utrustning med hänsyn till omgivningspåverkan
- beskriva svenska och utländska normer, praxis och erfarenheter från omgivningspåverkan vid pålnings- och spontningsarbete.

Projektet har indelats i fem delprojekt:

1. Svenska och utländska normer, praxis och erfarenheter
2. Överföring av vibrationer i jorden från källan till skadeobjekt
3. Omgivningspåverkan i friktionsjord
4. Omgivningspåverkan i lera och silt
5. Buller utomhus och i byggnader

Projektens arbete leddes av ordf. Björn Lundahl, Scandiaconsult och Sven-Erik Rehnman, KTH. Huvudsekreterare i projektet och ansvarig för sammanställningen av rapporten har varit Staffan Hintze.

För varje avsnitt ansvarar en utredningsman. För avsnitt 1 och 2 svarar Rainer Massarsch, Geo Engineering AB/KTH, för avsnitt 3 Staffan Hintze, Scandiaconsult/KTH, för avsnitt 4 Sven Liedberg, CTH samt för avsnitt 5 Magnus Hansson/Hans Elvhammar, DNV Ingemansson AB.

Som rådgivare fanns en gemensam grupp bestående av representanter från entreprenörer, konsulter, myndigheter och utländska experter. Dessa har framfört värdefulla synpunkter under arbetets gång och är:

- Kent Adolfsson, Banverket, Göteborg
- Per-Evert Bengtsson, SGI
- Arne Bohman, HERCULES Grundläggning
- Rolf Brink, Skadebyrå AB
- Anders Fredriksson, ADG Grundteknik AB
- Lars Hellman, IVA Pålkommisionen
- Leif Jendeby, NCC-Teknik
- Rolf Klerborg, Eskilstuna Kommun
- Per Land, SIAB
- Bertil Lindberg, Pålentreprenörföreningen
- Nils-Åke Nilsson, KM Akustikbyrå AB
- Rikard Skov, Danmarks Geotekniske Forening
- Göran Wallmark, Banverket, Stockholm

Projektgruppen och författarna framför sitt varma tack till alla som bidragit med värdefulla synpunkter under arbetets gång.

Stockholm i december 1996

Innehåll

Förord

Summary	8
----------------------	---

Sammanfattning	9
-----------------------------	---

Förslag till anvisningar och riktlinjer vid projektering och utförande	10
---	----

1. Inledning	10
2. Vibrationsutredning	10
3. Bullerutredning	11
4. Prediktionsmodell för vibrationer i byggnader	11
5. Förslag till arbetsgång vid spont- och påslagning i lera och silt	12
5.1 Stegvis arbetsgång vid prognos av omgivningspåverkan på grund av höga porövertryck	
5.2 Arbetsgång vid prognos av omgivningspåverkan på grund av jordundanträngning	
6. Förslag till arbetsgång vid spont och påslagning i friktionsjord	14
6.1 Planering och projekteringsskede	
6.2 Genomförandeskede	
6.3 Efter att arbetet avslutats	

1. Allmänt om omgivningspåverkan	16
---	----

1.1 Inledning	16
1.2 Vibrationer i jord	17
1.3 Effekter i friktionsjord	18
1.4 Effekter i lera och silt	19
1.5 Påverkan på angränsande konstruktion	19
1.6 Påverkan från buller och stomljud	21
1.7 Påverkan på människan av vibrationer och buller	22

2. Svenska och utländska normer, praxis och erfarenheter	23
---	----

2.1 Inledning	23
2.2 Vibrationer	23
2.2.1 Vibrationers inverkan på människor i byggnader	
2.2.2 Vibrationers inverkan på byggnader	
2.3 Buller	27
2.3.1 Riktvärden i Sverige	
2.3.2 Förslag till nya riktvärden i Sverige	
2.3.3 Tillämpning av riktvärden i Sverige	
2.3.4 Riktvärden inom EU	
2.3.5 Riktvärden i övriga länder	
2.4 Inverkan på utrustning i byggnader	33
2.4.1 Känslig utrustning	

2.4.2	Riktvärden i Sverige	
2.4.3	Tillämpning av riktvärden i Sverige	
2.4.4	Riktvärden utomlands	
3.	Överföring av vibrationer i jorden från källan till skadeobjektet	36
3.1	Inledning	36
3.1.1	Definitioner och begrepp	
3.1.2	Vågutbredning i jord	
3.1.3	Jords dynamiska egenskaper	
3.2	Påslagning	38
3.2.1	Hejare	
3.2.2	Påle	
3.2.3	Samverkan påle - jord	
3.3	Vågutbredning	38
3.3.1	Avståndsdämpning	
3.3.2	Resonanseffekter	
3.4	Inverkan av vibrationer på jord och grundkonstruktioner	41
3.4.1	Sättningar i friktionsjord	
3.4.2	Böjningseffekter	
3.4.3	Skador på grundkonstruktioner och installationer i jord	
3.5	Praktiskt exempel	43
4.	Omgivningspåverkan i friktionsjord	45
4.1	Inledning	45
4.2	Inverkande faktorer	45
4.2.1	Materialegenskaper	
4.2.2	Slagningsmetod	
4.2.3	Jordegenskaper	
4.2.4	Antal slag och antal pålar	
4.2.5	Stoppslagkriterier	
4.2.6	Variation i jordegenskaper	
4.2.7	Upprepad påverkan	
4.3	Sättningar	49
4.3.1	Storlek och utbredning av sättningar	
4.4	Hävningar	52
4.5	Förändring av hållfasthet i jorden	52
4.6	Påverkansreducerande åtgärder	54
5.	Omgivningspåverkan i lera och silt	55
5.1	Inledning	55
5.2	Generering av porvattenövertryck	55
5.2.1	Analytiska metoder för prognostisering av porvattenövertryck	
5.2.2	Prognostisering av porvattenövertrycket med hjälp av CPT-sondering	
5.2.3	Prognostisering av porvattenövertryck med hjälp av provpålning	
5.3	Jordundanträngning	59
5.4	Hållfasthetsförändring	62
5.5	Stabilitetsproblem vid pål- och spontslagning nära slänt	62
5.6	Påverkansreducerande åtgärder	64
5.7	Prognostisering, kontroll och uppföljning	65
5.7.1	Porvattenövertryck	
5.7.2	Markhävning och sidorörelser	

6. Buller utomhus och i byggnader	66
6.1 Inledning	66
6.1.1 Bullrets störverkan	
6.1.2 Bullrets hörselskadeverkan	
6.1.3 Vibrationernas störintryck	
6.2 Källdata för spont- och pålningsutrustning	68
6.2.1 Olika maskin- och påltyper	
6.2.2 Framtagning av källdata genom ljudmätning	
6.3 Inverkande faktorer för ljudutbredning utomhus	70
6.3.1 Avståndsdämpning	
6.3.2 Riktningsverkan	
6.3.3 Atmosfärsdämpning	
6.3.4 Markdämpning	
6.3.5 Reflekterande ytor	
6.3.6 Skärmdämpning	
6.3.7 Övriga faktorer	
6.4 Ljudisolering hos fasader	74
6.4.1 Ljudisoleringsdata för fasadväggar	
6.4.2 Ljudisolering hos fönster	
6.4.3 Ljudisolering hos friskluftsdon	
6.4.4 Beräkning av luftljudsnivån i byggnad	
6.5 Stomljud i byggnader orsakade av markvibrationer	75
6.5.1 Stomljud alstrat av vertikala vibrationer	
6.5.2 Stomljud alstrat av horisontella vibrationer	
6.5.3 Beräkningsmodell för stomljud	
6.6 Modell för vibrationer inomhus	77
6.6.1 Vertikala vibrationer	
6.6.2 Horisontella vibrationer	
6.7 Störningsminskande åtgärder	79
6.7.1 Bullerminskning vid källan	
6.7.2 Avskärmning eller inbyggnad av bullerkälla	
6.7.3 Bullerminskning vid mottagaren	
6.7.4 Andra åtgärder	
6.7.5 Kostnader	
6.8 Modell för buller	81
6.8.1 Förenklad metod för buller ute och inne	
6.8.2 Fullständig metod för buller utomhus	
6.8.3 Fullständig metod för buller inomhus	
Referenser	83
Appendix 1. Omgivningspåverkan vid pålning och spontning	89
Exempel A - Omgivningspåverkan vid spont och påslagning i lera och silt	
Exempel B - Omgivningspåverkan vid spont och påslagning i friktionsjord	
Exempel C - Buller och vibrationer i byggnader	
Appendix 2. Buller	94
Appendix 3. Ljudmätningar	98
Appendix 4. Definitioner av storheter för buller och vibrationer	103

Summary

The purpose of this report was to describe environmental disturbance when driving displacement piles, and to discuss ways of minimising such disturbance.

All foundation work influences the surroundings in one way or another. This applies not only to nearby buildings, streets and subsurface pipes and cables, but also to equipment, installations and in particular human beings.

Analysing the risks of damage and choosing the right method of foundation construction is of great importance for minimising the total costs of such work, especially when installing piles.

Even if there are no generally accepted methods for calculating the local disturbance from piling and sheeting, large amounts of data and empirical knowledge are available.

This report compiles such experience taken from studies of both Swedish and foreign sources. The results have been compared and discussed under the following chapters.

- Swedish and foreign standards, practice and experience
- Transfer of vibrations in the soil from source to surrounding site
- Local disturbance in friction soil
- Local disturbance in clay and silt
- Noise outdoors and inside buildings

The introductory chapter provides an overview of the whole area, while the concluding chapter contains guidelines for project design and execution. The guidelines are intended to provide a basis for clarifying how displacement piles and sheeting can be installed without disturbing the surroundings. The possibility of using various protective measures are discussed.

Appendix 1 contains examples intended to describe the local disturbance from vibration and noise when installing piles in clay and silt, as well as in friction soil. Appendixes 2-4 contain detailed descriptions of noise effect data, noise level measurements and definitions of magnitudes for noise and vibrations.

The report shows that in design, execution and monitoring connected with piling and sheeting work, predictions of movements, vibrations, changes in strength and noise should be made as early as possible in the project. The risk of future damage or expensive interruptions of piling and sheeting work will thereby be avoided. The risk analysis can be divided into three phases:

- Planning and project design
- Execution
- Monitoring

In the planning and design phase, information should be obtained on nearby buildings, the sensitivity of the area to disturbance, and piling and sheeting work.

During the execution phase, measures should be planned for reducing environmental disturbance if this is likely to exceed acceptable levels. A monitoring programme should be drawn up and experienced geotechnical personnel should follow the project throughout its execution or certain parts of it.

After the work has been concluded, monitoring by means of inspection and crack examination of nearby buildings and structures should be performed. Monitoring should take place on repeated occasions.

The report is intended for geotechnical designers, foundation engineers and others occupied with installing displacement piles, where installation work may affect the surroundings in any way.

Sammanfattning

Syftet med denna rapport har varit att beskriva påverkan på omgivningen vid slagning av massförträngande pålar och spont samt diskutera sätt för att minimera omgivningspåverkan.

Allt grundläggningsarbete påverkar sin omgivning på något sätt. Detta gäller såväl påverkan på angränsande byggnader, gator och markförlagda ledningar, som störningar på utrustningar, installationer och inte minst enskilda människor.

Att analysera riskerna för påverkan samt att välja rätt metod för utförande av grundkonstruktioner har stor betydelse för att minimera den totala kostnaden i samband med grundläggning. Speciellt viktigt är detta vid slagning av pålar och spont.

Även om det inte finns generellt accepterade metoder för att beräkna omgivningspåverkan vid pålning och spontning, finns det en mängd mätningar och empirisk kundskap.

I denna rapport har sammanställts sådana erfarenheter hämtade från studier av både svenska och utländska källor. Resultaten har jämförts och diskuterats under följande avsnitt:

- Svenska och utländska normer, praxis och erfarenheter
- Överföring av vibrationer i jorden från källan till skadeobjekt
- Omgivningspåverkan i friktionjord
- Omgivningspåverkan i lera och silt
- Buller utomhus och i byggnader

I inledningskapitlet ges en överblick över hela området medan sista kapitlet belyser riktlinjer att beakta vid projektering och utförande. Dessa riktlinjer ska ge underlag för att klarlägga hur slagning med massförträngande pålar/spont kan göras utan att skada omgivningen. Möjligheten att använda olika typer av omgivningsreducerande åtgärder diskuteras.

I appendix 1 finns exempel som är avsedda att beskriva omgivningspåverkan vid pålning och spontning vid lera och silt, vid friktionsjord, för vibrations-transport samt för buller. I appendix 2-4 finns detaljerad beskrivning av ljudeffektdata, ljudnivåmätningar och definitioner av storheter för buller och vibrationer.

Rapporten vill visa att det vid planering, projektering, genomförande och efterkontroll i samband med pålning- och spontningsarbeten bör prognos av rörelser, vibrationer, hållfasthetsförändringar och buller genomföras så tidigt som möjligt i projektet. Därigenom kan risken för framtida skador eller kostsamma avbrott av spont- och pålningsarbeten undvikas. Arbetsgången kan delas upp i tre olika skeden:

- planering och projektering
- genomförandet
- efterkontroll

I planerings- och projekteringskedet bör uppgifter om omgivande byggnader, uppgifter om områdets påverkans känslighet och uppgifter om pålning-/spontningsarbetet anskaffas.

Under genomförandeskedet bör åtgärder i förväg planeras in som kan minska omgivningspåverkan om denna överstiger vad som kan accepteras. Ett kontrollprogram bör särskilt utarbetas och erfaren geoteknisk personal bör följa projektet under hela eller delar av genomförandet.

Efter att arbetet avslutats bör efterkontroll genom besiktning och sprickkontroll av omgivande byggnader och konstruktioner göras. Kontrollen bör göras vid flera tillfällen och tidpunkter efter avslutandet.

Rapport vänder sig till geokonstruktörer, grundläggare och andra som arbetar med pålning och spontning där arbetet kan påverka omgivningen på något sätt.

Förslag till anvisningar och riktlinjer vid projektering och utförande

1. INLEDNING

Dessa anvisningar och riktlinjer skall ge underlag för att klarlägga om slagning med massförträngande pålar/spont kan användas utan att skada omgivningen. Kapitlet redovisar även förslag till arbetsgång. Det behöver inte alltid göras en pass så detaljerad analys som redovisas i detta kapitel, utan omgivningens påverkanskänslighet styr detaljeringsgraden.

Vid planering av pålningsarbeten i tätort eller i närheten av vibrationskänsliga byggnader, konstruktioner eller anläggningar bör en vibrationsprognos och bullerprognos genomföras så tidigt som möjligt. Därigenom kan risken för framtida skador eller kostsamma avbrott av spont- och pålningsarbeten undvikas. Arbetsgången kan delas upp i tre olika skeden:

- planering och projektering
- genomförandet
- efterkontroll.

2. VIBRATIONSUTREDNING

I planerings- och projekteringsskedet bör följande information anskaffas:

1. Allmänna förutsättningar:

- de geotekniska och geohydrologiska förutsättningar inom en radie av ca. 200 m (dock minst ett avstånd motsvarande 5 pållängder) omkring pålningsplatsen,
- läge (avstånd), höjd (antal våningar) och allmän kondition av befintliga byggnader, golv eller andra vibrationskänsliga konstruktioner,
- byggnadernas dynamiska egenskaper, bedömning av byggnadsstommens och golvens egenfrekvenser,
- byggnadernas grundläggningssätt,
- ledningar och trummors läge samt deras kondition,
- slänter och schakter och deras stabilitet och

- resultat av tidigare vibrationsmätningar eller skadetredningar i området.

2. Information om spont- och pålningsmetod (vibrationskällan)

- pålslagingsmetod (frifall, hydraulisk hejare, vibrationshejare etc.),
- påltyp och dess dynamiska egenskaper (material, pållängd, diameter, skarvningsmetod etc.),
- pålens impedans,
- stoppslagingskriterium,
- resultat från sonderingar eller provpålning.

3. Vibrationsprognosen bör omfatta:

- förenklad jordprofil mellan pålningsplatsen och riskzonen,
- uppskattning av slagningsenergens storlek under olika pålningsfaser (slagning genom torrskorpa/frusen jord, skarvning, stoppslagning),
- uppskattning av vågutbredningens geometriska dämpning,
- bedömning av jordlagars egenfrekvens och övertoner (för analys av resonanseffekter i golv eller byggnadsdelar),
- bedömning av risk för vibrationsfokusering från fastare jordlager,
- identifiering av riskzoner med avseende på miljöeffekter (människor), byggnader eller byggnadsdelar.

Med ledning av vibrationsprognosen kan bedömas om risk för skador på byggnader eller påverkan på boende- och arbetsmiljön föreligger. Om så är fallet bör en detaljerad riskanalys genomföras, som skall omfatta:

- detaljerad studie av kringliggande byggnaders kondition och dynamiska egenskaper,

- dokumentation av befintliga skador på byggnader eller andra konstruktioner,
- val av maximalt tillåtna vibrationsamplituder,
- provpålning på säkert avstånd från vibrationskänsliga byggnader eller anläggningar, samt
- kartläggning av möjliga vibrationsreducerande åtgärder.

Provpålning med vibrationsmätningar skall genomföras på betryggande avstånd från potentiellt vibrationskänsliga områden. Vibrationsmätningar bör ske i en sektion mellan pålningsplatsen och befintliga byggnader. Geofoner skall installeras dels på marken, dels på fundamentet samt eventuellt på övervåningar av representativa byggnader. Svängningshastighetens variation under påslagningens typiska faser (start, skarvning, stoppslagning etc) skall mätas helst i 3 riktningar. Resultatet av vibrationsmätningarna skall jämföras med den tidigare genomförda vibrationsprognosen, för att fastställa dess tillförlitlighet.

Om vibrationsmätningarna tyder på att vibrationsproblem kan uppstå måste olika åtgärder vidtas. Det första steget är att fastställa det för pålningsprojektet kritiska området. Som möjliga åtgärder för att minska omgivningspåverkan finns:

- ändring av pålningsmetod (borrning eller vibrer i stället för slagning),
- ändring av påltyp (t ex val av pålar med högre impedans),
- förborrning innan slagning,
- ändring av stoppslagningskriterier, som ofta har stor betydelse för de maximala markvibrationer,
- utökad vibrationskontroll och dokumentation av befintliga skador,
- användning av processtyrning vid påslagning (t. ex. användning av mätvärden från geofoner som styr slagningsintensitet eller vibratorfrekvens),
- val av tidpunkt där störningen är minst och
- utökad information till berörda parter.

3. BULLERUTREDNING

I kapitel 6 beskrivs ett "verktyg" med vilket störningsrisker kan bedömas och om och när bullerdämpande åtgärder behöver sättas in. Det är också en stor fördel att ha ett beslutsunderlag inför diskussioner med länsstyrelser och andra instanser som skall bedöma vilka gränsvärden som skall tillämpas i varje enskilt fall.

Verktyget består av 4 delar:

1. Källdata för uppemot 20 olika pål- och spontningsmetoder, med olika kombinationer av påle/spont och ljuddämpningsåtgärder. Data har sammanställts ur drygt 230 olika ljudmätningar funna vid litteratursökning.
2. Modeller för att förutsäga uppträdande
 - ljudnivåer utomhus
 - luftljudsnivåer i byggnad
 - stomljudsnivåer i byggnad
 - vibrationsnivåer i byggnad
3. Svenska och utländska riktlinjer för byggbuller
4. Sammanställning av störningsminskande åtgärder

På sikt bör prognosmetoden leda fram till att man kan rita upp en bullerzonkarta kring påslagning/spontningsplatsen, där hänsyn också tas till omkringliggande byggnaders inverkan på ljudutbredningen.

Modellen bör kompletteras och verifieras genom mätningar på byggplatser samt anpassas efter svenska förhållanden (utrustning, marktyp etc). Framförallt när det gäller marktypens och slagenergiens inverkan på ljudnivån till omgivningen saknas resultat från systematiska mätningar. De bullerminskande åtgärder som finns beskrivna är dessutom oftast dokumenterade under utprovningen; utvärdering av erfarenheterna efter en tids användning saknas däremot.

4. PREDIKTIONSMODELL FÖR VIBRATIONER I BYGGNADER

Vertikala vibrationer

För att kunna bestämma vibrationsnivån i byggnad krävs indata i form av vibrationsnivå i byggnadens grundläggning. Den här redovisade modellen förutsätter att den vertikala vibrationshastighetsnivån i grunden $L_{v,ver,gr}$ är känd. Vidare måste en förstärkningsfaktor K_{res} bestämmas som beror på aktuellt bjälklag. I kapitel 6.6.1 anges en metod för att bestämma K_{res} för betongbjälklag.

Ur dessa ingångsdata kan vibrationsnivån mitt på ett bjälklag $L_{v,bjlg}$ bestämmas som

$$L_{v,bjlg} = L_{v,ver,gr} + K_{res} \text{ dB}$$

Horisontella vibrationer

Någon färdig metod modell för prediktering av horisontella vibrationer i en byggnad finns ej redovisad här. Anledningen är att variationerna i vibrationsnivå i horisontalled mellan olika byggnader som utsätts för

samma markvibrationer är mycket stor. Styvheten i horisontalled är betydligt lägre framförallt i trähus och hus med pelardäckstomme. Detta ger förstärkning av vibrationer långt ner i frekvensområdet. Man bör därför i känsliga lägen utföra provpålning och parallella vibrationsmätningar i mark och på flera våningsplan. Se vidare kapitel 6.6.2.

5. FÖRSLAG TILL ARBETSGÅNG VID SPONT- OCH PÅLSLAGNING I LERA OCH SILT

De omgivningspåverkansproblem som man framförallt ställs inför vid spont- och pålslagning i lera och silt är stabilitetsproblem och markhävningssproblem samt i vissa fall bärighetsproblem för själva pålen innan dess att eventuella porvattenövertryck har utjämnats. När det gäller stabilitetsproblemen kan dessa utlösas av hållfasthetsnedsättning på grund av den störning som jorden utsatts för, höga genererade portryck i permeabla skikt av till exempel silt eller sand samt förhöjda jordtryck i till exempel en slänts aktivzon på grund av stora sidosvängningar. Markhävningssproblem är främst förknippade med låg- till mellansensitiva jordar samt i de fall spont- eller

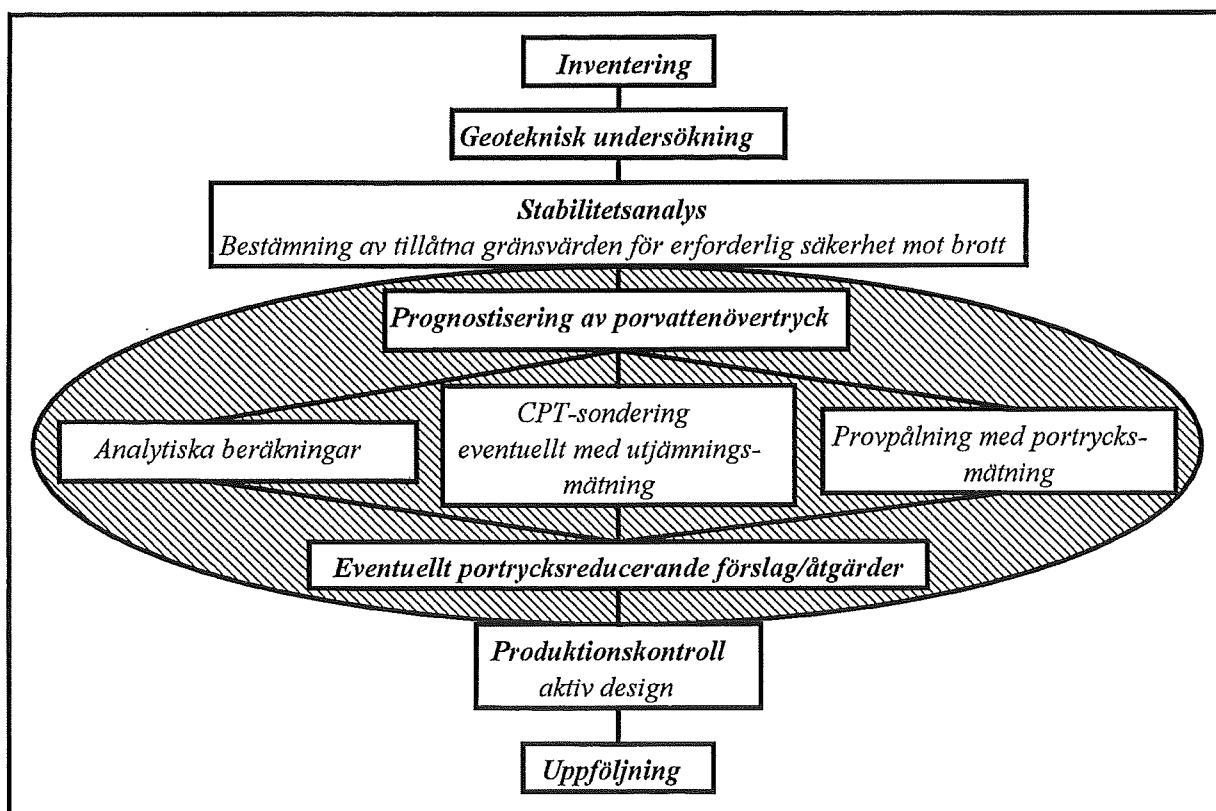
pålningssarbeten utförs i en befintlig konstruktions närområde. Bärighetsproblemet för slagna pålar är huvudsakligen ett tidsproblem dvs hur lång tid krävs för att jorden runt pålen ska rekonsolidera så att pålen kan bära de laster som är aktuella i det fortsatta arbetet. Hur dessa problem kan identifieras och hanteras är beskrivet i kapitel 5. I det följande beskrivs ett förslag till arbetsgång för de fall omgivningspåverkan bedöms som kritisk.

5.1 Stegvis arbetsgång vid prognos av omgivningspåverkan på grund av höga porövertryck

I figur 1 visas en principiell arbetsgång för hur porvattenövertryck kan prognostiseras och hanteras i projekteringskedet såväl som i byggskedet.

Inventering

Allt geotekniskt arbete börjar i regel med en inventering av redan utfört arbete för den aktuella platsen eller närbelägna områden. Av speciellt intresse är om tidigare utredningar pekat på stabilitetsproblem. I vissa fall är flygbildstolkning ett utmärkt komplement till förståelseuppbyggnaden av områdets geologi och



Figur 1. Arbetsgång med hänsyn till omgivningspåverkan på grund av porövertryck.

topografi. Med hjälp av flygbildstolkningen kan till exempel gamla skredårr identifieras. Inventeringen kan även utgöra grund för planeringen av grundundersökningen.

Grundundersökning

Grundundersökningen bör ge svar på följande frågor:

- undergrundens stratigrafi
- topografi
- jordarnas relativa fasthet
- grundvattenförhållanden
- jordarter
- tunghet, γ
- naturlig vattenkvot, w
- konsistensgränser, w_L , (ev. även w_p för att kunna bestämma en leras skjuvmodul G_o enligt ekv. (5.4, eller 5.10))
- sensitivitet, S_t
- odränerad skjuvhållfasthet, τ_{fu}
- konsolideringsegenskaper, σ'_c

För att erhålla dessa svar krävs sondering, provtagning (störd och ostörd), porttrycksmätning samt avvägning. Då misstanke finns om att eventuell påslagning kan ge höga porvattenövertryck och därmed stabilitetsproblem bör spetstrycksondering av typ CPT utföras. Vid sondering enligt klass CPT3 och klass CPT2 erhålles även en approximativ bestämning av jordens odränerade skjuvhållfasthet. Erforderliga parametrar fås från till exempel vingförsök i fält, rutinundersökningar på tagna jordprover i laboratoriet samt från CRS-ödometerförsök.

Stabilitetsanalys

Stabilitetsanalysen bör utföras i enlighet med Skredkommissionens anvisningar för släntstabilitetsutredningar (1995). I denna skrift framgår även hur dränerade hållfasthetsparametrar bör väljas för lera, silt och sand samt hur hänsyn till anisotropi kan tas. Lägsta tillåtna säkerhetsfaktor skall väljas på basis av undersökningens detaljeringsgrad och beräkningsmetod.

I analysen bör hänsyn tas till eventuell reduktion av hållfastheten på grund av pålningsarbetet enligt till exempel ekv. (5.16) samt förhöjda jordtryck i en slänts aktivzon enligt Figur 5.5.

Beräkningarna bör resultera i satta gränsvärden på maximalt tillåtet porvattenöverskott i de skikt som anses kritiska för att minsta tillåtna säkerhetsfaktor inte skall underskridas.

Prognostisering av porvattenövertryck

Genererade porvattenövertryck är framförallt beroende av jordens hållfasthet, skjuvmodul, sensitivitet, konsolideringsegenskaper och avstånd från källan.

• Analytiska beräkningar

Analytiska beräkningar utförs främst för pålens eller spontens närområde dvs inom den plastiska zonen med ekv. (5.3) eller diagrammet i Figur 5.2.

• CPT-sondering, eventuellt med utjämningsmätning

Spetstrycksondering av typ CPT bör utföras i lägst klass 2 eller 3. Metoden ger en god bild av de förväntade poröverskottens storlek vid påslagning. Metoden är att föredra framför de analytiska modellerna då jordens stratigrafi är komplex eller om undergrunden huvudsakligen består av silt.

Rekonsolideringen runt pålen kan tidsmässigt beräknas med hjälp av ekv. (5.13) på basis av utjämningsförsök vid uppehåll i sonderingen.

• Provpålning med porttrycksmätning

Önskas en detaljerad bild av porttrycksuppbyggnaden inklusive den geometriska spridningen för en viss typ av hejare är provpålning inklusive porttrycksmätning enligt kap. 5.2.3 att föredra. Porttrycksmätningen bör planeras med hjälp av CPT-sondering vilket ytterligare ökar kunskapen om hur porttrycken påverkas.

Eventuellt porttrycksreducerande förslag/åtgärder

Bedöms porttrycksuppbyggnaden som kritisk bör porttrycksreducerande åtgärder vidtas. I kap. 5.6 listas ett antal förslag till eventuella åtgärder.

Produktionkontroll, aktiv design

De vidtagna påverkansreducerande åtgärderna måste kontrolleras (se kap. 5.7). Hur kontrollen bör ske bör finnas reglerat i ett till bygghandlingarna hörande dokument. I detta dokument bör även regleras vilka åtgärder som skall vidtas om satta gränsvärden överskrids. Dokumentet kan förslagsvis innehålla en övervakningsplan och en åtgärdsplan enligt Ohlsson m. fl. (1994). De båda planerna kan upprättas efter det att en gedigen problemidentifikation genomförts. Planerna bör innehålla de punkter som redovisas i tabell 1.

Tabell 1. Övervakningsplan och åtgärdsplan (efter Ohlsson m. fl., 1994)

Övervakningsplan	Åtgärdsplan
• Plan och sektioner över placering av mätpunkter och givare. • Förteckning över givare avseende typ, antal, krav på noggrannhet, precision och mätområde. • Avläsningsintervall för olika givare. • Anvisningar för hur mätdata skall redovisas. • Intervall för redovisning. • Till vilka personer och organisationer mätdata skall redovisas.	• Gränsvärden/tröskelvärden för olika parametrar, gärna uppdelade i flera nivåer. • Förteckning över åtgärder som skall vidtas när de olika gränsvärdena överskrids. • Förteckning över vilka personer eller organisationer som skall kontaktas vid ett överskridande av gränsvärden.

Uppföljning

När påslagningsarbetet är avslutat bör effekterna följas upp åtminstone fram till slutbesiktningen. Instrumentering mm bör dock planeras så att man även efter slutbesiktningen kan följa upp effekterna av verksamheten.

5.2 Arbetsgång vid prognos av omgivningspåverkan på grund av jordundantäckning

Inventering

Utöver den generella arbetsgången för prognostisering, påverkansreduktion, kontroll och uppföljning av porvattenövertryck enligt ovan tillkommer till inventeringsarbetet en bedömning av effekterna för närbelägna konstruktioner eller slänter med avseende på markhävningar eller sidoförskjutningar.

Eventuellt påverkansreducerande åtgärder

Bedöms jordundantäckning som kritisk bör påverkansreducerande åtgärder vidtas. I kap. 5.6 listas ett antal förslag till eventuella åtgärder.

6. FÖRSLAG TILL ARBETSGÅNG VID SPONT OCH PÅLSLAGNING I FRIKTIONSJORD

De omgivningspåverkansproblem som uppträder i samband med pål- och spontslagning i friktionsjord är framförallt sättningar. I vissa fast lagrade friktionsjordar uppträder även hävningar. Det finns även risk att lagringsförhållandet förändras och därmed hållfasthetsegenskaperna i jorden. Bedömning av omgivningspåverkan bör därför inriktas på dessa påverkanproblem vid slagning i friktionsjord.

Den stegvisa arbetsgång som beskrivits för lera och silt i avsnitt 5 i detta kapitel kan användas även för friktionsjord. I avsnitten 6.1 till 6.3 nedan beskrivs faktorer som är speciellt viktiga att beakta i olika skeden i samband med slagning i friktionsjord.

6.1 Planering och projekteringskedje

Följande uppgifter är viktiga att ta fram:

uppgifter om omgivande byggnader

- typ av byggnad
- typ av grundkonstruktion
- kondition
- variationer i byggnadens egenskaper
- brukbarhetskrav

uppgifter om områdets grundförutsättningar

- jordart
- lagringstäthet
- variationer i grundförutsättningar
- marknivålutning
- grundvattennivå
- temperatur i marken (risk för tjäle)

uppgifter om spont/pålningsarbetet

- slagningsmetod
- avstånd mellan slagning och skadeobjekt
- längd på påle/spont
- fallhöjd och fallvikt
- förväntat antal slag och antal pålar
- tvärsnittsarea på påle/spont
- ytstruktur/material
- risk för excentriska eller ojämna slag
- omfattning av förborring
- stoppslagningskriterium

Om inventeringsarbetet ger upphov till misstanke att omgivningen kan skadas bör en detaljerad analys genomföras. En detaljerad analys bör omfatta:

- en detaljerad studie av uppgifter enligt avsnitt 5.1 i detta kapitel
- en besiktning och dokumentation av befintliga skador
- en planering för att kunna sätta in påverkansreducerande åtgärder om detta blir nödvändigt

Materialet bör samlas in under planering och projekteringsskedet. Det är väsentligt att den/de personer som medverkat under planering och projekteringskedet får möjlighet att följa upp sitt arbete i det följande genomförandeskedet.

6.2 Genomförandeskede

Om påverkan under genomförandeskedet överstiger vad som kan accepteras krävs påverkansreducerande åtgärder. ett kontrollprogram under genomförandeskedet bör utarbetas och erfaren geoteknisk personal bör följa särskilt svåra projekt under hela eller delar av projektet. Påverkansreducerande åtgärder kan vara:

Fysikaliska åtgärder:

- ändrad slagningsmetod
- minskad längd på påle/spont
- minskad fallhöjd
- minskat antal slag och antal pålar
- minskad tvärsnittsarea på påle/spont
- slätare ytstruktur
- minska risken för excentriska eller ojämna slag
- ökad omfattning av förborrning
- mildare stoppslagningskriterium
- förstärka omgivande konstruktioner

Entreprenadberoende faktorer:

- kvalitetssäkringsprogram
- utbildning av personal
- incitamentklausuler i avtalet
- kontrollprogram
- medverkan av geotekniker under genomförandet

6.3 Efter att arbetet avslutats

Sprickkontroll av omgivande byggnader och platsbesök skall göras efter att arbetet avslutats. Kontroll bör göras vid flera tillfällen och tidpunkter efter avslutandet. För vissa typer av byggnader kan det ta åtskilliga år innan en skada utvecklats och full samverkan mellan olika byggnadsdelar kan ske långsamt.

Kapitel I.

Allmänt om omgivningspåverkan

1.1 INLEDNING

Denna rapport behandlar omgivningspåverkan till följd av slagning med massundanträngande pålar och spont. Övriga påltyper behandlas endast översiktsmässigt.

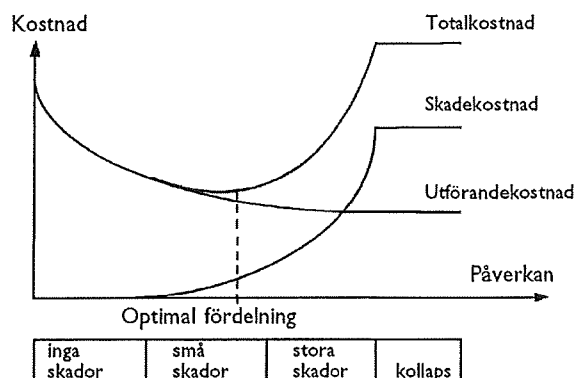
Under slutet av 1980-talet beräknades totalkostnaden för anläggningsarbeten i Sverige, inklusive vägbyggande och markarbeten i anslutning till husbyggande, till omkring 30 miljarder kronor årligen. Erfarenhetsmässigt uppgår kostnader för att reparera skador som uppkommer i samband med dessa arbeten till omkring 0,5 % av totalkostnaden. Detta innebär ca 150 miljoner kronor årligen i skadekostnader. I en studie vid Chalmers Tekniska Högskola, med bidrag från SBUF och BFR, konstaterades att ca 6 % av produktionskostnaden går åt till att rätta till fel som uppkommit under byggprocessen (projektering och byggande). I denna kostnad ingår då stilleståndskostnader, förseningskostnader etc.

Vid grundläggningsarbeten finns det risk för skador på omgivande bebyggelse, vilket kan bli dyrbart för inblandade parter. Att analysera omgivningspåverkan och balansera kostnaden för utförande mot kostnaden för omgivningspåverkan är av stor betydelse för att uppnå en låg totalkostnad för ett projekt.

Det finns idag inga generellt accepterade metoder för att beräkna omgivningspåverkan. Konsulter, entreprenörer, myndigheter och försäkringsbolag arbetar med egna metoder baserade på egna erfarenheter.

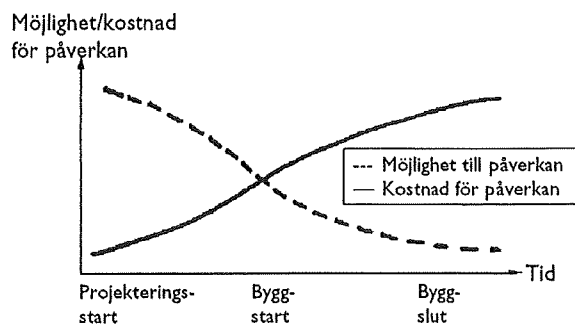
Ur ekonomisk synvinkel bör man utvärdera vad det kostar att hålla sig under en fastställd skadegräns mot vad det kostar att åtgärda skador som förväntas uppkomma på egna och omgivande byggnader. Ett "bra" beslut bör därför vara sådant att det blir en optimal fördelning mellan utförandekostnad och skadekostnad för att uppnå lägsta totalkostnad. Detta belyses i *figur 1.1*.

En bedömning av omgivningspåverkan i ett tidigt skede av projektet innebär ett nödvändigt underlag för kostnadskalkyler och beslut för den fortsatta projek-



Figur 1.1. Optimering mellan utförandekostnad och skadekostnad ger lägsta totalkostnad. Hintze (1994).

tering och utförandet. Kostnaden för att ändra metod i ett tidigt skede av ett projekt är i allmänhet lägre och möjligheten större. Detta visas principiellt i *figur 1.2*. Även om omgivningspåverkan inte kan bestämmas exakt kan påverkan ofta uppskattas tillräckligt bra för att ge underlag till den praktiska riskhanteringen.



Figur 1.2 Om påverkan/åtgärden görs i ett tidigt skede av grundläggningsprocessen är möjligheten större och kostnaden mindre för åtgärden.

Slagning med massundanträngande pålar och spont kan på olika sätt påverka omgivningen. Det gäller såväl påverkan på angränsande byggnader, gator och markförlagda ledningar som störningar på utrustningar och enskilda människor.

Vid slagning av pålar och spont i friktionsmaterial kan packningseffekter ge sättningar i omgivande konstruktioner och därmed sammanhängande skador. Hållfasthetsegenskaperna i jorden kan också påverkas på ett ogynnsamt sätt.

Vid slagning av pålar och spont i lera och silt är jordundanträngning, oönskade vibrationer och hållfasthetsförändringar i jorden vanliga. Jordundanträngningen kan orsaka sidorörelser i jorden.

Vibrationer som fortplantas via jorden till en byggnad kan ge upphov till rörelser i byggnader och driftsstörningar på känslig utrustning.

Buller och vibrationer kan ge upphov till obehag och påverka boendemiljön och arbetsmiljön i närliggande fastigheter.

Normer och krav i Europa och övriga världen skiljer sig många gånger från svenska beträffande tillåtna nivåer på buller, vibrationer etc. En samordnad syn saknas idag.

1.2 VIBRATIONER I JORD

Vibrationer, som uppstår i samband med pålning och spontning kan försämra boendemiljön och kan störa vibrationskänsliga instrument och installationer. Påkänningar i byggnader som framkallas av pålslagning är normalt inte så stora att dessa ensamma orsakar skador. Under ogynnsamma förhållanden kan dock vibrationer, ofta i kombination med andra faktorer (inbyggda, befintliga spänningar i byggnader, orsakade av till exempel ojämna sättningar) initiera sprickbildning eller medföra skador.

Trots att man i många länder har börjat tillämpa restriktiva vibrationsnormer vid spontnings- och pål-

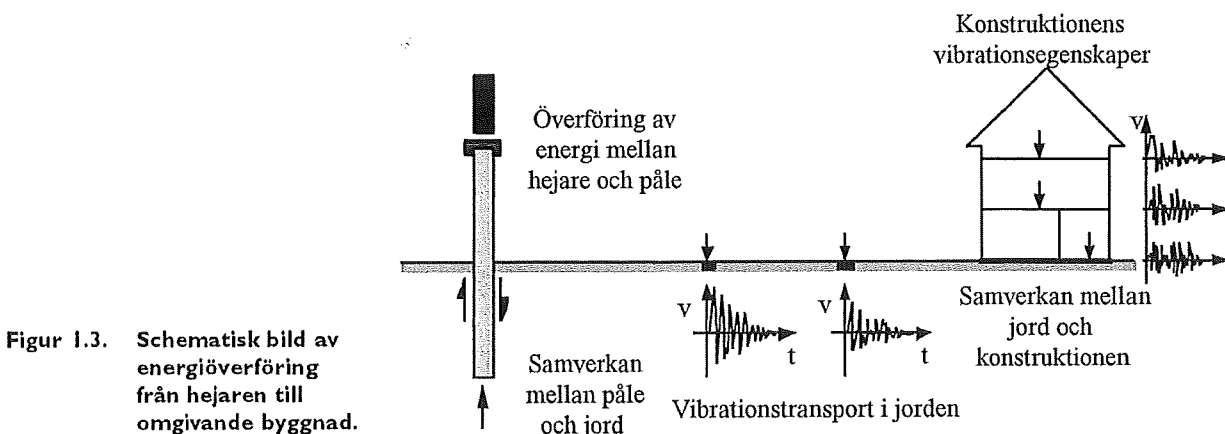
ningsarbeten, är de faktorer som påverkar vibrationers uppkomst och utbredning in jorden ofta otillräckligt kända. Många gånger baseras riskanalyser på empiriska regler och förenklade antaganden. Därför är det inte förvånande att tillförlitligheten av dessa analyser ofta är låg. I vissa fall överraskas man därför av oväntade vibrationsskador medan man i andra fall tillämpar restriktioner som leder till ineffektiva och därmed kostsamma grundläggningsarbeten.

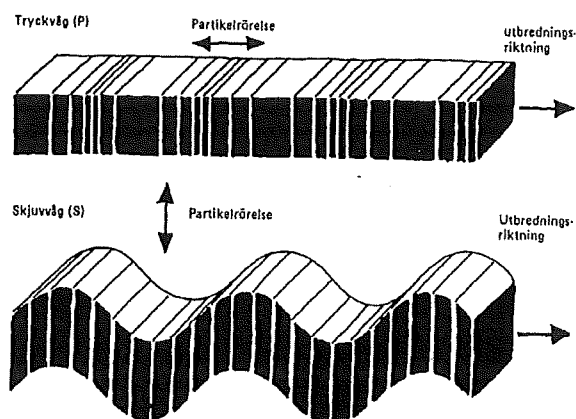
Det finns ett flertal olika faktorer som är av betydelse för vibrationsproblem vid pålnings- och spontningsarbeten. Problematiken presenteras på ett förenklat sätt för att åskådliggöra samverkan mellan olika faktorer. *Figur 1.3* visar en schematisk bild över de fem problemområden som måste beaktas:

- Energiöverföring hejare -påle.
- Energiöverföring påle - jord
- Vågutbredning i jord.
- Samverkan byggnad - undergrund.
- Vibrationsförstärkning i byggnaden.

Vibrationsproblem kan delas upp i två kategorier, aktiva och passiva vibrationsproblem. Aktiva vibrationsproblem avser i första hand förhållandena vid och i närheten av vibrationskällan, dvs i det aktuella fallet samverkan mellan pålen och jorden. Passiva vibrationsproblem behandlar vågutbredningen i jord samt inverkan av vibrationsenergin på installationer i jord eller byggnader i och på jord.

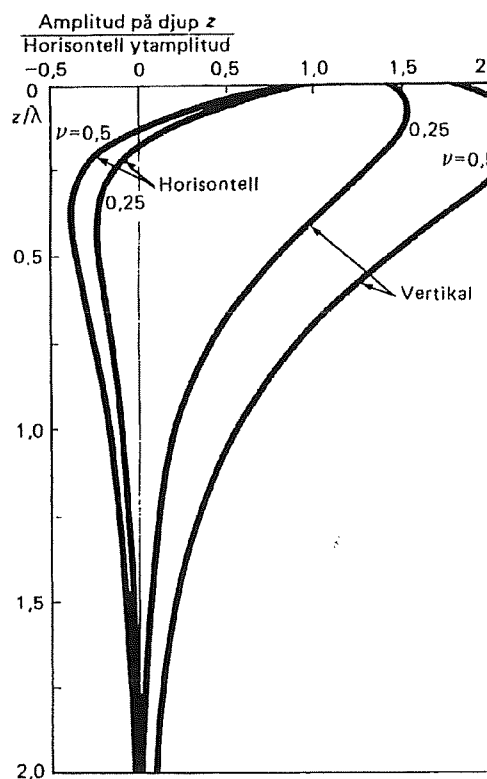
Svängningsenergin fortplantar sig i jord i form av elastiska vågor. Två olika vågtyper kan urskiljas. Den snabbaste vågen kallas tryckvåg (P-våg) och försätter jordpartiklarna i en fram- och återgående svängningsrörelse längs utbredningsriktningen. Den långsammare skjuvvågen (S-vågen), framkallar partikelrörelser vinkelrätt mot vågens utbredningsriktning. P- och S-vågor kallas gemensamt för volymvågor, *figur 1.4*.





Figur 1.4. Volymvågor vid elastisk vågrörelse i jord.

I en fri yta uppstår ytvågor av olika slag, bl. a. Rayleighvågor (R-vågor). Rayleighvågor framkallar en elliptisk partikelrörelse. Svängningsamplituden minskar med djupet enligt figur 1.5. Av figuren framgår att R-vågens vertikalamplitud är större än dess horisontalamplitud, som dessutom snabbt avtar med



Figur 1.5 Rayleighvågens horisontella och vertikala svängningsamplitud som funktion av djupet z , Poissons tal ν och våglängden λ , Massarsch (1984).

djupet. I skiktade material förekommer dessutom horisontellt polariserade ytvågor, s k Love-vågor (L-vågor).

Vid påslagning är svängningsamplituderna på ett avstånd större än en pållängd i allmänhet små (mindre än ca 10^{-5} skjuvtöjning) och jorden uppträder då huvudsakligen som ett elastiskt medium.

Jord består av en blandning av fasta partiklar och porer som är fyllda med vätska och/eller gas. Vågutbredningen sker delvis genom kornskelettet och delvis genom vätskan i porerna. P-vågen kan fortplanta sig såväl genom vätskan som genom de fasta partiklarna. S-vågen däremot kan endast utbreda sig genom kornskelettet, eftersom vatten inte kan överföra skjuvspänningar. Eftersom R-vågen består av en speciell typ av reflekterade P- och S-vågor och utbreder den sig i både kornskelettet och porvätskan.

Inom ett område motsvarande ca en våglängd från vibrationskällan dominerar P- och S-vågorna. På större avstånd dominerar ytvågorna.

Våglängden λ av en svängningsrörelse i ett homogent elastiskt medium kan beräknas enligt nedanstående samband

$$\lambda = c / f \quad (1.1)$$

där c är vågens utbredningshastighet och f är svängningsfrekvensen. Förhållandet mellan våglängden och mäktigheten av jordlagret genom vilket vågen passerar, har praktisk betydelse eftersom det kan framkalla resonansproblem. Kompressions- och ytvågor i jord har ofta våglängder mellan 5 och 15 m, som motsvarar mäktigheten av lösa jordlager på fast botten. Även grundvattenytans läge påverkar vågutbredningen.

1.3 EFFEKTER I FRIKTIONSJORD

Spont- och påslagning i friktionsjord påverkar omgivande jord och närliggande konstruktioner. Påverkan ger främst upphov till sättningar i jorden och ojämna rörelser i konstruktioner, med skador som följd. Även hävningar och hållfasthetsförändringar kan uppstå i friktionsjord. Detaljer kring problemet behandlas i kapitel 4.

En principiell uppdelning av omgivningspåverkan vid på- och spontslagning i friktionsjord kan göras enligt följande:

- sättningar
- hävningar
- förändring av hållfastheten i jorden

Med sättningar menas i detta fall deformationer i jorden till följd av packningseffekter. Vibrationer uppstår vid påslagningen, fortplantas i jorden och kan packa löst lagrad friktionsjord. Packningen av jorden kan ge ojämna deformationer i byggnaden och dess grundkonstruktion.

Med hävningar menas att jorden har en så hög initieellt lagringstäthet att pålarna trycker undan jorden och orsakar hävningar i närliggande konstruktioner. Om jorden initieellt har hög lagringstäthet uppkommer en dilatans (svällning) i jorden, vilket innebär att lagringstätheten blir lägre och hållfastheten i jorden minskar.

I praktiken är sättningar i friktionsjord svåra att analytiskt beräkna och baseras därför vanligen på empiriska resultat från det aktuella området.

Faktorer som inverkar vid pål- och spontslagning i friktionsjord kan delas upp i:

- fysikaliska faktorer knutna till pålning/spontningsarbetet (material, pållängd, slagningsutrustning, jordförhållanden, grundvattenyta, etc)
- entreprenadberoende faktorer knutna till pålning/spontningsarbetet (kunskapsnivå, upphandlingsform, kontrollprogram, etc)
- fysikaliska faktorer knutna till omgivande konstruktioner (byggnadstyp, grundläggningstyp, kondition, etc)

1.4 EFFEKTER I LERA OCH SILT

Spont- och påslagning i lera eller silt ger upphov till massundanträngning och strukturella störningar vilka kan leda till avsevärda egenskapsförändringar för jorden och ge upphov till störningar på omgivningen, till exempel befintliga grundkonstruktioner. Störningseffekterna grundar sig i själva massundanträngningen och den dynamiska belastning som jorden utsätts för vid själva slagningen. Den dynamiska effekten kan bli speciellt påtaglig vid påslagning genom torrskorpa, fyllning och frusen mark.

När det gäller lera och silt yttrar sig effekterna främst i förhöjda porvattentryck, nedsatt hållfasthet och massförskjutningar. De jordmekaniska konsekvenserna av dessa effekter är främst:

- stabilitetsproblem
- bärighetsproblem
- markhävning
- horisontalförskjutningar
- negativ mantelfriktion

Stabilitetsproblemen kan uppstå som en konsekvens av reducerade effektivspänningar, minskad odränerad skjuvhållfasthet eller förhöjda horisontal-spänningar i till exempel en slänts aktivzon.

Speciellt gäller för leror med inslag av permeabla skikt och/eller sandskikt att effekten av påslagningen kan sprida sig över stora områden då dessa skikt kan fungera som transportörer av de porvattenövertryck vilka genereras av påslagningen. Vid projektering är det därför av största vikt att hitta sådana permeabla skikt till exempel med CPT-sondering.

Förhöjda porvattentryck och mekanisk omrörning medför reducerad hållfasthet som kan ge upphov till bärighetsproblem för själva pålen (sponten). Effekterna är dock avtagande med tiden och kan i regel relateras till rekonsolideringsförloppet av de genererade porvattenövertrycken.

Markhävning och horisontalförskjutningar har visat sig bli större med minskande sensitivitet. Även markhävningarna har dock visat sig avta med tiden, allt eftersom jorden rekonsoliderar. I vissa fall har till och med en nettosättning erhållits. En risk finns med andra ord för negativ mantelfriktion på grund av en lokal markhävning vid påslagning.

1.5 PÅVERKAN PÅ ANGRÄNSANDE KONSTRUKTION

En viktig del i arbetet med att analysera omgivningspåverkan är att uppskatta vad den ger för konsekvens på angränsande byggnader/konstruktioner. Konsekvensen av omgivningspåverkan i friktionsjord behandlas i kapitel 4, i friktionsjord i kapitel 5.

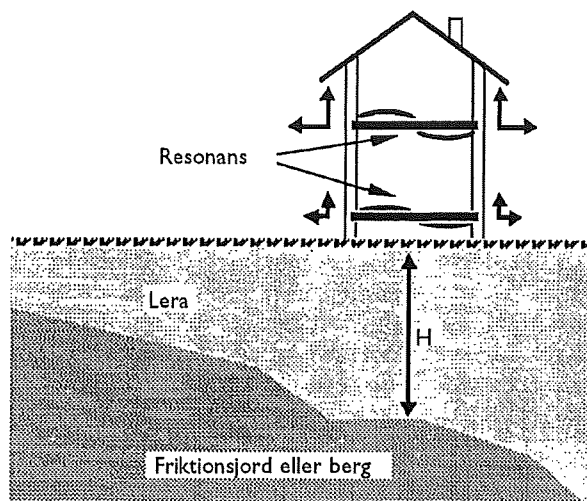
Det är i huvudsak tre aspekter som måste beaktas när man bedömer omgivningspåverkan:

- estetiska och komfortmässiga
- användbarhet och funktionella
- stabilitet och konstruktiva

Olika byggnader och konstruktioner påverkas olika av en given störning. Samverkan mellan olika delar såsom byggnad, grundkonstruktion och undergrund är av stor betydelse. Denna samverkan är dock i allmänhet svår att beskriva i detalj. Vibrationer påverkar byggnader på ett speciellt sätt och belyses i figur 1.6.

Osäkerheter vid bedömning av konsekvensen beror i huvudsak på följande:

- osäkerheter i bestämning av jordens egenskaper och hur de påverkar

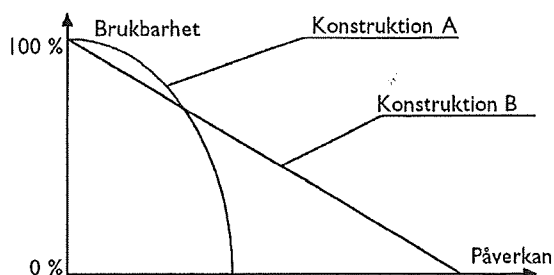


Figur 1.6. Vibrationers påverkan på konstruktioner. Efter Massarsch (1992).

- osäkerheter i bestämning av omgivande byggnaders egenskaper och kondition beträffande hållfasthet, deformationstålighet m m och hur de påverkar
- osäkerheter om hur övriga faktorer, såsom tid, kunskapsnivå, upphandlingsform, kontrollprogram, etc påverkar

Påverkan kan ge upphov till en skada. En skada är emellertid svårt att definiera exakt och det sker vanligen en successiv övergång från en opåverkad till en skadad situation. En beskrivning av förhållandet mellan brukbarheten och påverkan är därför i allmänhet lämpligare som definition. Detta visas i figur 1.7.

En sättning eller hävning i en byggnad innebär i allmänhet ingen större olägenhet så länge den sker jämnt över byggnaden. Sättningar och hävningar i



Figur 1.7. Princip för skada i en byggnad. En funktion som beskriver förhållandet mellan brukbarhet och påverkan är bättre som kriterium än en skarp skadegräns. Efter Olsson och Stille (1984)

anslutningar mellan byggnadsdelar skapar dock olägenhet. Skada uppstår då ojämna rörelser uppstår inom byggnaden (vinkeländring). Vinkeländringen ger upphov till drag-, tryck- och skjuvspänning som medför sprickor och skador i svaga partier i byggnaden.

De viktigaste faktorerna som styr storleken av omgivningspåverkan på byggnaden är:

- konstruktionstyp
- grundläggningstyp
- kondition hos byggnaden
- grundförhållanden
- varaktighet och frekvens av påverkan

Normer, praxis och rekommendationer för att beskriva skador är i huvudsak baserade på empirisk kunskap. Kriterier för skada på omgivningen är ofta påverkad av den lokala situationen. Det är också värt att notera att de skadekriterier som återfinns i litteraturen ofta är baserade på ytgrundlagda byggnader och inte på pålgrundlagda byggnader.

Det finns också skäl till varför så få teoretiska rapporter, men så många empiriska rapporter har presenterats för skadekriterier. Några skäl är:

- användbarhet är subjektivt och beror på både funktionen av byggnaden och acceptansen hos brukaren
- byggnader varierar mycket, både i stort och i smått, vilket medför att ett generellt skadekriterium är svårt att skapa
- byggnader uppför sig sällan som beräknat därför att byggnadsmaterialens egenskaper skiljer sig i verkligheten ifrån de som antagits i projekterings-skedet.
- befintligt spänningstillstånd är okänt

Variationer beträffande styvhet, spänningstillstånd och kondition i olika delar av byggnader har visat sig resultera i lokala skador i vissa partier i byggnader.

Ett förslag till klassificering och beskrivning av skador i byggnader har gjorts av Skempton och MacDonald (1956) och visas i tabell 1.1. Denna klassificering används i stor utsträckning i dag.

En klassificering av byggnader baserad på dess konstruktionstyp har gjorts av Studer och Suesstrunk (1981) och framgår av tabell 1.2.

I Sverige används vid riskanalyser i samband med sprängningsarbeten ibland indelningen från Svensk Standard SS 4604866, se tabell 1.3. Byggnader indelas här med hänsyn till vibrationskänsligheten i kon-

Tabell 1.1. Klassificering av skador i byggnader. Efter Skempton och MacDonald (1956).

estetisk skada	påverkar utseendet av byggnaden och är vanligen relaterad till sprickor
funktionell skada	påverkar användningen av byggnaden och är vanligen relaterad till väggar och golv med påtagliga sprickor, nedfallen puts och lutning
konstruktiv skada	påverkar stabiliteten av byggnaden och vanligen relaterad till bärande delar som balkar, pelare och bärande väggar

Tabell 1.2. Klassificering av byggnader baserad på dess konstruktionstyp efter Studer och Suesstrunk (1981).

konstruktions-klass	typ av konstruktion
I	Armerad betong och stålkonstruktioner (utan fasadputs) såsom industribyggnader och kommersiella byggnader
II	Byggnader med de bärande delarna i betong samt med murade väggar eller väggar i betong
III	Byggnader med bärande delar i grundkonstruktionen och bottenvåningen av betong och med bärande delar i övre våningarna i trä eller murat tegel.
IV	Byggnad som är speciellt känslig eller värd att skydda

Tabell 1.3. Klassificering av byggnader baserad på Svensk standard SS 4604866.

Klass	Fb
1) Tunga konstruktioner som broar, kajer försvarsanläggningar o dyl.	1,70
2) Industri- och kontorsbyggnader	1,20
3) Normala Bostadsbyggnader	1,00
4) Speciellt känsliga byggnader som museer och övriga byggnader med höga valv eller konstruktioner med stora spännvidder	0,65
5) Historiska byggnader i ömtåligt skick samt vissa känsliga ruiner	0,50

struktionen i 5 klasser. Klass 1-4 gäller byggnader i gott skick. Byggnadsfaktorn Fb beskriver den relativa vibrationskänsligheten.

Resultat från skaderegleringar i samband med påslagning i tätortsförhållanden visar att skadekostnaden ökar stegvis mot storleken av påverkan, Hintze (1994).

Konsekvensen av påverkan beror främst på fyra faktorer :

- storlek på påverkan
- typ av byggnad
- funktionskrav från brukaren (verksamhetskrav)
- värdet på byggnaden

Ett bra sätt att sänka totalkostnaden vid ett pålnings/spontningsprojekt är att göra en tidig analys av omgivningspåverkan. Påverkansreducerande åtgärder sätts in när dessa är ekonomiskt, eller av andra skäl, riktiga.

1.6 PÅVERKAN FRÅN BULLER OCH STOMLJUD

Buller och vibrationer från pål- och spontslagning i samband med byggverksamhet kan vara mycket störande, framförallt i tätorter. Bullret (Störningar som utbredd genom luften) kan, beroende på tidsschemat för arbetet, kraftigt påverka såväl boendemiljö som kontors- och affärsarbetsplatser i närliggande fastigheter. Bullret tränger in i byggnaderna huvudsakligen genom fönstren). Till detta kommer obehag från vibrationer som också kan uppfattas störande av människan och påverka funktionen hos känslig utrustning. Vibrationer med frekvenser inom det hörbara området kan också orsaka ljudstörningar i form av stomljud inomhus. I kapitel 6 utvecklas dessa delar mer och visas även på verktyg för analys och åtgärder.

Det finns flera anledningar till att buller från pålning och spontning ger andra problemställningar än annat samhällsbuller:

- arbetet sker i det fria
- arbetet har begränsad varaktighet
- bullret från olika typer av utrustning har mycket olika karaktär och kan variera under olika faser i arbetet
- man kan inte genom samhällsplanering förlägga arbetet till platser som är mindre känsliga för buller
- bullret kan ge resonansproblem

Spont- och pålningsbuller är starkt varierande och innehåller ofta kortvariga slag- och stötljud, så kallat impuls ljud, med en repetitionsfrekvens som varierar beroende på den använda neddrivningsmetoden. Inga speciella bestämmelser anges för denna typ av ljud i anvisningarna för byggbuller, utan impulserna inkluderas i den ekvivalenta ljudnivån ("medelljudnivån").

Bullrets impulsartade karaktär gör att det uppfattas mer störande än motsvarande ekvivalenta ljudnivåer från en mera kontinuerlig ljudorsak, som t ex

trafikbuller.

Pål- och spontslagningsbuller är också ett arbetsmiljöproblem, främst för personal som befinner sig intill utrustningen.

Vid kontakter med Miljö- och Hälsoskyddsförvaltningarna i våra största kommuner har framgått att man ser pål/spontslagningsbullret som ett mycket påtagligt miljöproblem. Orsaken till att man ännu inte i någon större utsträckning bevakar dessa problem är bristen på detaljkunskaper om åtgärder och kontrollmöjligheter. En bättre prognosmetodik skulle i hög grad bidra till att rätta till dessa brister.

Mycket av den litteratur som behandlar pålnings/spontningsbuller är utländsk, vilket förmodligen beror på att man från myndigheters sida agerat tidigare och kraftfullare än i Sverige och därmed påskyndat utveckling av bullerreducerande åtgärder. Hongkong, Singapore och Japan är förmodligen de länder där man kommit längst med att behandla bullerproblematiken innan byggprojekten påbörjas. Även i Storbritannien, Tyskland och Schweiz finns standarder som behandlar buller och vibrationer från pål- och spontslagningsbuller.

I Shiyetaka (1977) finns en sammanställning över problem vid byggnadsarbeten i Japan. I 73 % av fallen beror problemen på buller och vibrationer, se *tabell 1.4*.

Tabell 1.4. Anledning till klagomål på störningar vid byggande i Japan.

Orsak	Antal fall	Andel (%)
Buller	57	44,5
Vibrationer	37	28,9
Sänkt grundvattennivå	9	7,0
Avloppssystem	8	6,2
Marksättning	7	5,5
Sophantering	4	3,1
Damm	3	2,4
Dålig lukt	2	1,6
Trafikförorening	1	0,8
Totalt	128	100,0

I "Handlingsplan mot buller", Statens Offentliga utredningar 1993:65, finns följande förslag angående byggbuller:

"VAL AV MASKINER OCH METODER

Vid all verksamhet får endast maskiner som typgodkänts med avseende på låg ljudnivå användas. Vidare, om flera metoder för att utföra arbetet finns, skall, om det är tekniskt möjligt och ekonomiskt rimligt, den metod som ger lägsta buller väljas.

FÖRVÄNTADE BULLERNIVÅER

För objekt som kräver miljökonsekvensbeskrivning skall alltid förväntade bullernivåer från byggverksamheten etc redovisas i denna."

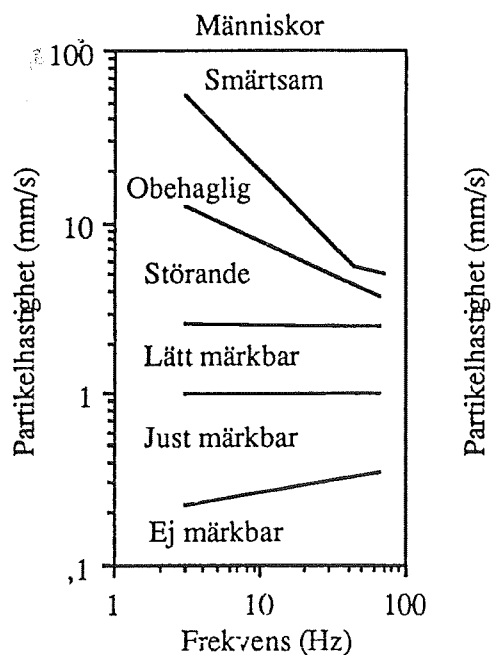
1.7 PÅVERKAN PÅ MÄNNISKAN AV VIBRATIONER OCH BULLER

Generellt gäller att människan reagerar kraftigare för små vibrationer än vad byggnader gör. Människan påverkas också av tidpunkten för påverkan och av psykologiska effekter. Dessa effekter är svåra att värdera. Vana av att vara påverkad av vibrationer och buller har betydelse liksom den information som ges innan arbetet påbörjas. Människors inställning till de bullrande och vibrerande arbetena påverkar också reaktionerna. Buller påverkar människan i flera avseenden, både fysiskt, psykiskt och socialt. Buller kan alltså:

- Skada hörseln- gäller vid höga nivåer och lång expositionstid som t.ex personal vid pålsagningsutrustning utsätts för
- Hindra samtal
- Vara störande och irriterande

I kapitel 2 behandlas riktvärden och kriterier för bedömning av inverkan från buller och vibrationer på människan.

Vibrationers påverkan på människor belyses principiellt i *figur 1.8*.



Figur 1.8. Vibrationers påverkan på människor. Efter Massarsch (1984).

Kapitel 2.

Svenska och utländska normer, praxis och erfarenheter

2.1 INLEDNING

Normer och anvisningar för vibrationer och buller har tagits fram i många länder. I takt med den europeiska integrationen kommer nationella bestämmelser att förändras och anpassas. Därför ger den nedan redovisad sammanställningen endast en temporär bild av de regler som har använts under de senaste åren. En detaljerad beskrivning och diskussion av normer i olika länder ges av Holmberg (1982), Long (1989), Massarsch och Broms (1991) samt Head och Jardine (1992). Beträffande rörelser finns inga normer varför detta område inte har behandlats.

Vid en bedömning av pål- och spontslagningens inverkan bör man skilja mellan själva byggnaden (grundkonstruktion och byggnadsstomme) och enskilda byggnadsdelar (väggar och golv) samt i byggnaden installerad utrustning och personer som uppehåller sig i byggnaden. Svenska och utländska vibrationsnormer har tagits fram främst med avseende på sprängning och trafik. Däremot behandlas andra störningskällor som pålning, spontning eller annan byggsamhet endast undantagsvis.

Vibrationskällans dynamiska egenskaper, som påverkas i första hand av slagningsmetoden (påltyp, slagningsutrustning, slagningsförfarandet), pålmaterialet och slagningsmotståndet i jorden (geotekniska förutsättningar nära pålen) är av stor betydelse och bör inkluderas i en riskanalys. Pålningsmetoder kan skilja sig avsevärt i olika länder. Frifallshejare, som är vanligast i Sverige, framkallar normalt transienta vibrationer (stötar) medan vibrationshejare, som används utomlands i större utsträckning, ger upphov till kontinuerliga (stationära) vibrationer.

I detta avsnitt diskuteras vibrationsnormer: vibrationers inverkan på människor (som styrs i hög grad av subjektiva upplevelser) och skador på byggnader (som påverkas främst av byggnadens kondition och undergrundens geodynamiska egenskaper).

Sättningar och hävningar i byggnadskonstruktioner är normalt långsamma rörelseförlopp, som inte observeras av människan genom känselsinnet. I den mån förloppen är snabba, värderas de som vibrationer enligt avsnitt 2.2.

2.2 VIBRATIONER

2.2.1 Vibrationers inverkan på människor i byggnader

Störningsgraden beror på ett flertal faktorer som vibrationers intensitet, varaktighet och frekvensområde samt kroppens position (stående eller liggande) och riktning i förhållande till vibrationskällan. I många fall ökar sekundära effekter, som akustiska förmimmelser (skakningar av fönster och porslin) eller rörelser av inredningsdetaljer (tavlor, lampor m m) störningsupplevelsen. Tidpunkten på dagen och förhållanden i omgivningen (bostad eller industri) har också stor betydelse. När personer informeras i förväg om tidpunkten för vibrationsstörningen samt att vibrationsreducerande åtgärder har vidtagits, så upplevs störningen ofta som mindre. På grund av den subjektiva bedömningen av störningsgraden är det därför svårt att fastställa generella riktlinjer för personer i olika situationer.

De brittiska normerna BS 5228 och BS 6472 (1984) anger riktvärden för hur personer påverkas av vibrationer i byggnader (inom frekvensområdet 1 till 80 Hz). Den tyska normen DIN 4150, del 2 (1986) är mest utvecklad och tillämpas i ett flertal europeiska länder. Där föreslås svängningsparametern KB som mått på störningsgraden, som beräknas med ledning av accelerationen a , svängningshastigheten v eller förskjutningen u enligt nedanstående formler

$$KB = a \frac{20,2}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}} \quad (2.1)$$

$$KB = v \frac{0,13 f}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}} \quad (2.2)$$

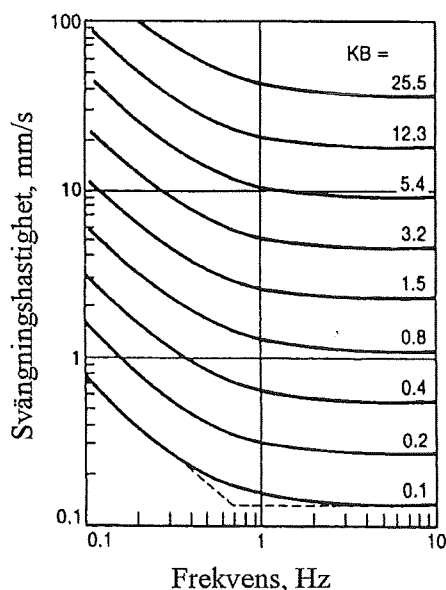
$$KB = u \frac{0,8 f^2}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}} \quad (2.3)$$

där:

- a = acceleration (m/s²)
- v = hastighet (m/s)
- u = förskjutning (mm)
- f = frekvens (Hz)
- f₀ = referensfrekvens (5,6 Hz)

KB-värdet är en frekvensberoende parameter vars betydelse ökar med avtagande frekvens, särskilt vid frekvenser lägre än 1 Hz. *Figur 2.1* ger sambandet mellan den uppmätta svängningshastigheten och den frekvensberoende svängningsparametern KB som funktion av frekvensen.

Tabell 2.1 ger ett samband mellan det beräknade KB-värdet och den subjektiva störningsgraden vid personers vistelse i byggnader.



Figur 2.1. Frekvensberoende svängningsparameter KB som funktion av svängningshastighet. Efter DIN 4150, del 2 (1986)

Tabell 2.1. Samband mellan svängningsparametern KB i byggnader och störningsgraden, efter DIN 4150 (1986), (index X, Y respektive Z motsvarar den uppmätta svängningsriktningen och B anger det resulterande värdet av flera svängningskomponenter)

Grad	Svängningsparameter KX, KY, KZ, KB	Beskrivning av upplevelsen
A	< 0,1	ej märkbar
B ₁	0,1	
B ₂	0,2	
C ₁	0,4	tydligt märkbar
C ₂	0,8	
D ₁	1,6	
D ₂	3,15	stark
E ₁	6,3	
E ₂	12,5	
E ₃	25	mycket stark
E ₄	50	
F	100	
	> 100	

Tabell 2.2 anger maximalt tillåtna KB-värden för olika bebyggelse typer och tidpunkter vid kontinuerlig respektive transient vibrationsbelastning.

Den brittiska standarden BS 6472 (1984) är baserad på riktlinjerna från ISO 2631 (1981) och anger värden på maximalt tillåten svängningshastighet när personer vistas i byggnader, *figur 2.2*. Hänsyn tas till svängningsriktningen (horisontal eller vertikal position) samt inverkan av den dominerande frekvensen. Kurvnummer i *figur 2.2* avser multiplikationsfaktorn i *tabell 2.3*.

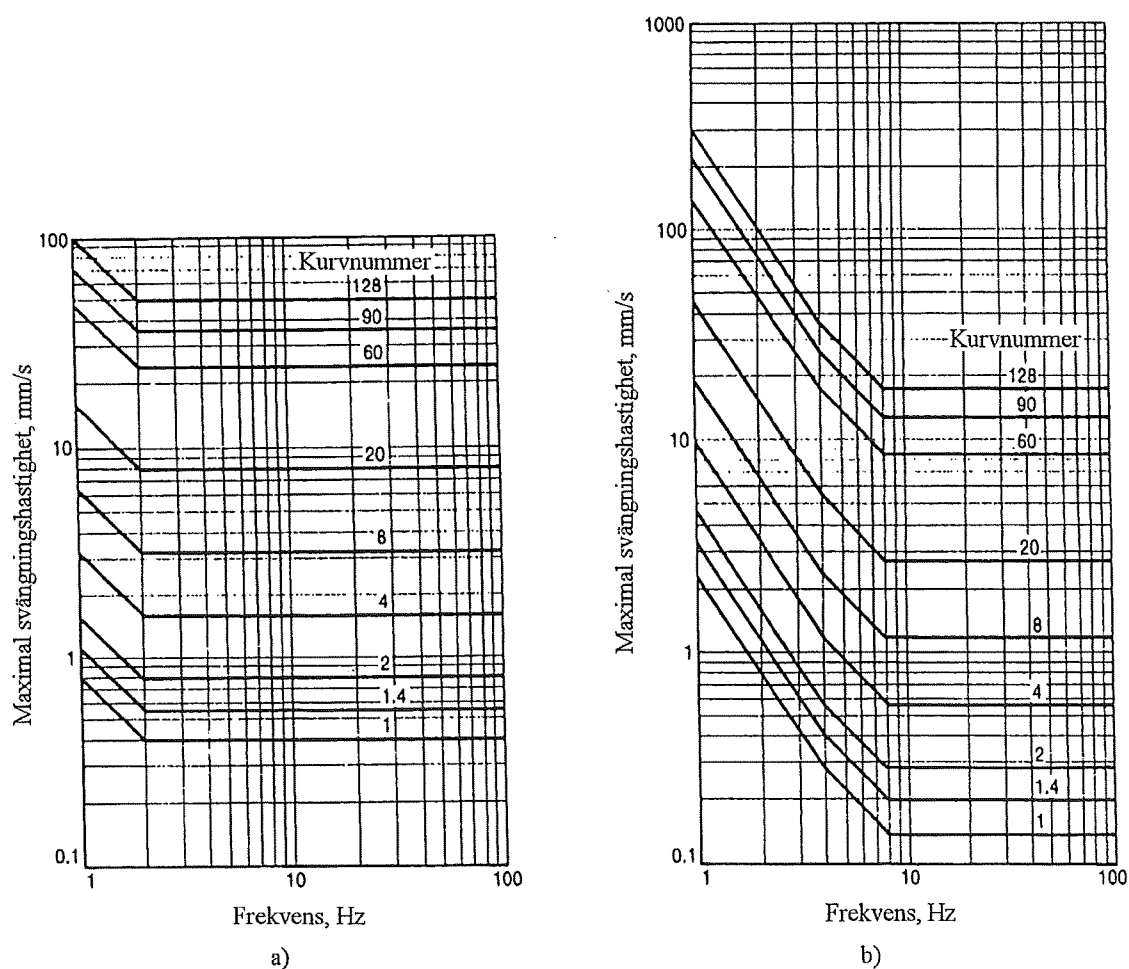
Med ledning av multiplikationsfaktorn i *tabell 2.3* kan hänsyn tas till tiden på dagen då störningen inträffar samt bebyggelse typ och typ av störningskälla.

2.2.2 Vibrationers inverkan på byggnader

Bedömningen av skaderisken för byggnader eller byggnadsdelar kan inte baseras på subjektiva iakttagelser genom personer, eftersom riskerna normalt övervärderas. Vid en riskanalys borde även andra möjliga orsaker för bestående och framtida skador än vibrationer inkluderas, som temperaturinverkan, inbyggda spänningar, krympsprickor och naturligt åldrande av material, Holmberg (1982). Skadekriterier för byggnader som redovisas i normer och anvisningar i olika länder har sammanställts av bl. a. Long (1989) och Massarsch och Broms (1991).

Tabell 2.2. Riktvärden för bedömning av vibrationer i byggnader efter DIN 4150 (1986).

Bebyggelsestyp	Tidpunkt	KB-riktvärden	
		Kontinuerliga vibrationer	Sällan inträffande vibrationer
Rent bostadsområde	dag	0,2 (0,15)	4
	natt	0,15(0,1)	0,15
Blandat bostadsområde	dag	0,3 (0,2)	8
	natt	0,2	0,2
Affärsområde inkl. kontor	dag	0,4	12
	natt	0,3	0,3
Industriområde	dag	0,6	12
	natt	0,4	0,4
Särskilt utvalda områden	dag	0,1... 0,6	4 ... 12
	natt	0,1 ... 0,4	0,15 ... 4



Figur 2.2. Samband mellan människans känslighet för vibrationer i byggnader: a) vibrationer i x- och y-riktning, b) vibrationer i z-riktning, efter BS 6472 (1984), kurvnummer bestäms från Tabell 2.3.

Tabell 2.3. Faktorer för bestämning av maximalt tillåten vibrationsamplitud i byggnader, BS 6472 (1984), jfr. Figur 2.2.

Bebyggelsestyp	Tidpunkt	Multiplikationsfaktor	
		Kontinuerliga vibrationer	Transienta vibrationer
Kritiskt område	dag	1	1
	natt	1	1
Bostadsområde	dag	2 till 4	60 till 90
	natt	1,4	20
Kontor	dag	4	128
	natt	4	128
Industriområde	dag	8	128
	natt	8	128

För skador på byggnader orsakade av vibrationer är frekvensintervallet 1 till 50 Hz av största betydelse. Vid en riskanalys med avseende på skadeverkan är det viktigt att beakta vibrationskällans samt byggnadens/grundkonstruktionens dynamiska egenskaper. Skador på byggnader kan delas upp i tre kategorier:

- ojämna sättningar under byggnaden (främst i löst lagrad friktionsjord),
- vågutbredningens inverkan på byggnadens grundkonstruktion (deformation av markytan) samt
- dynamiska förstärkningseffekter i stommen och i byggnadsdelar.

Sättningar i löst lagrad friktionsjord (särskilt i sand och silt med hög grundvattenyta) kan uppstå redan vid små svängningsamplituder, av storleksordningen 1 - 2 mm/s. Denna typ av vibrationsskador, som påverkas av de geotekniska förutsättningarna under den aktuella byggnaden, omnämns ej explicit i normer men kan förorsaka betydande skador redan vid relativt små svängningsamplituder. Skadeverkan förstärks om sättningarna är ojämna (exempelvis vid varierande jordlagermaktighet eller vid stora spänningsvariationer under en byggnad) och om byggnadens grundläggning är bristfällig.

I den tyska normen DIN 4150 (1986) föreslås maximalt tillåtna värden på svängningshastighet för transienta svängningar enligt *Tabell 2.4*. Som mätvärde används den största komponenten av svängningshastigheten (i tre riktningar) uppmätt i byggnadens fundament.

Den schweiziska normen SN 640312 (1978) anger gränsvärden på maximalt tillåten svängningshastighet för sprängning (transienta svängningar) respektive trafik/maskiner (stationära svängningar). Hänsyn tas till byggnadstyp och olika frekvensområden (10 -

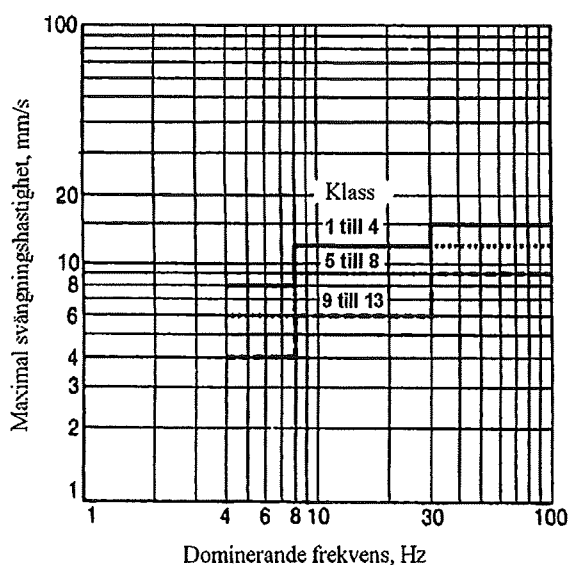
Tabell 2.4. Riktvärden på maximal svängningshastighet vid transienta svängningar, DIN 4150, del 3 (1986).

Byggnadskategori	Maximal svängningshastighet, mm/s		
	Frekvens, Hz		
	< 10	10 - 50	50 - 100
Kontor, industrier och liknande	20	20 - 40	40 - 50
Bostadshus och liknande	5	5 - 15	15 - 20
Vibrationskänsliga byggnader	3	3 - 8	8 - 10

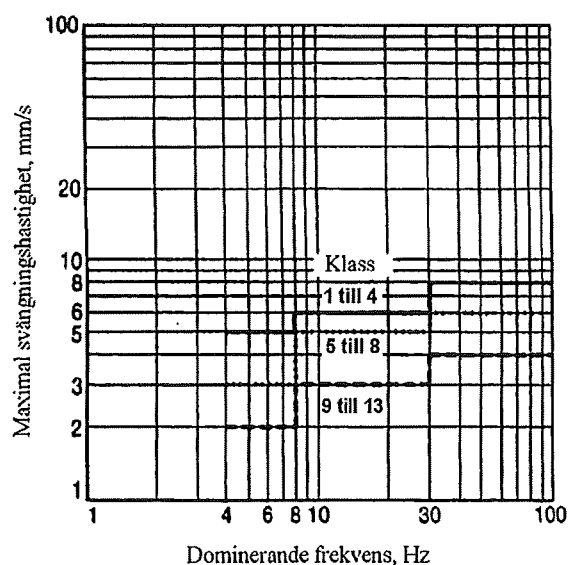
30 respektive 30 - 60 Hz). Dessa gränsvärden är av samma storleksordning som i DIN 4150.

De franska och engelska normerna bygger på den internationella standarden ISO 4866 (1990), som gäller för såväl kontinuerliga som transienta svängningar. Hänsyn tas till byggnadstyp, grundläggningssätt och grundkonstruktionens kvalitet. I *figur 2.3* visas gränsvärden för maximal svängningshastighet vid transienta respektive kontinuerliga svängningar för olika frekvenser.

Klassindelningen tar hänsyn till byggnadens standard, de geotekniska förutsättningarna samt grundläggningssättet. Klass 1 till 4 avser huvudsakligen byggnader av hög standard, grundlagda på berg eller fast jord, eller på sämre jord med pågrundläggning. Klass 5 till 8 gäller för normal byggnadsstandard, normal grundläggning och lös till medelfast jord. Klass 9 till 13 inkluderar vibrationskänsliga byggnader med bristfällig eller ingen grundläggning på lös, sättningsbenägen jord.



a) transienta svängningar



b) kontinuerliga svängningar

Figur 2.3. Gränsvärden för maximal svängningshastighet vid a) transienta och b) kontinuerliga svängningar, efter ISO 4866 (1990).

2.3 BULLER

2.3.1 Riktvärden i Sverige

I skriften "Buller från byggplatser" (Naturvårdsverket, publ. 1975:5 resp Socialstyrelsen, Råd och anvisningar nr 50) anges riktvärden för de byggbullernivåer som högst bör tillåtas vid olika typer av bebyggelse (se tabell 2.5). Riktvärdena avser den ekvivalenta ljudnivån i dBA under dag-, kvälls- resp nattetid.

Tabell 2.5. Riktvärden för externt byggbuller angivna som ekvivalent ljudnivå i dBA i öppet fönster för dag, kväll och natt.

Lokal	Dag 07-18 utom lör-, sön- och helgdag	Kväll 18-22 samt lör-, sön- och helgdag 07-18	Natt 22-07
Industri	75	70	70
Kontor	70	65	-
Bostäder	60	50	45

I anvisningarna anges avstegsfall för kortvarig byggverksamhet, då man tillåter högre gränsvärden:

- högst en månad + 10 dBA (dag/kväll)
- högst sex månader + 5 dBA (dag/kväll).

Vibrationsalstrat ljud (stomljud) i byggnader bör kunna bedömas på samma sätt som luftljudsalstrat buller inomhus från byggplatser. Eftersom krav en-

dast finns för byggplatsbuller i öppet fönster har ett förslag till nya gränsvärden lagts fram i "Handlingsplan mot buller", se kap 2.4.2.

2.3.2 Förslag till nya riktvärden i Sverige

I "Handlingsplan mot buller" (Statens Offentliga Utredningar 1993:65) ges följande förslag till riktlinjer för byggbuller.

Bedömningsgrunder

Beroende på förväntade ljudnivåer och verksamhetens tidsbegränsningar kan bedömningen ske enligt tre principer.

■ Grundvärden

Om den förväntade bullernivån vid angränsande byggnader ej överstiger värdena enligt tabell 2.6 behövs inga ytterligare åtgärder.

Tabell 2.6. Riktvärden för externt byggbuller utomhus, L_{eq} i dBA.

Byggnad	07-18, vardag	18-22, samt lör-, sön- och helgdag 07-18	22-07
Kontor	70	70	70
Bostäder	60	50	45
Vårdlokaler	60	50	45
Skolor	60	60	70

Samtliga värden avser ekvivalent ljudnivå L_{eq} mätt på uteplatser eller 2 m utanför fönster.

Den momentana ljudnivån, $L_{max, fast}$ får vid bostäder, vårdlokaler etc inte överstiga 55 dBA klockan 21-06.

■ Avstegsfall 1

Om bullernivån förväntas överstiga värdena enligt *tabell 2.6* skall gränsvärden fastställas av miljöförvaltningen i samråd med byggherren, bullerdämpande åtgärder vidtas samt kontrollplan upprättas. Inomhusvärdena enligt *tabell 2.7* skall innehållas.

Tabell 2.7. Riktvärden för byggbuller inomhus, L_{eq} i dBA.

Byggnad	07-18, vardag	18-22, samt lör-, sön- och helgdag 07-18	22-07
Kontor	45	45	
Bostäder	45	35	25
Vårdlokaler	45	35	25
Skolor	40	40	

Samtliga värden avser ekvivalent ljudnivå L_{eq} mätt inomhus med stängda fönster.

För verksamhet med begränsad varaktighet, högst 1-2 månader, spontning, pålning etc, kan 5 dB högre värden tillåtas.

Vid enstaka kortvariga händelser, högst 5 minuter per timme, kan ytterligare upp till 10 dBA högre nivåer accepteras.

Den momentana ljudnivån $L_{max, fast}$ får i bostäder, vårdlokaler etc inte överstiga 45 dBA klockan 21-06.

■ Avstegsfall 2

Vid byggnation i främst centrala lägen och speciellt vid om- och tillbyggnader kan även gränsvärden enligt *tabell 2.7* vara omöjliga att innehålla. I dessa fall måste noggranna beräkningar göras och störningsminskande åtgärder vidtas.

Information

Många störningar och klagomål kan undvikas genom att i god tid informera de kringboende om verksamheten och de störningar som kan uppstå.

Information till de kringboende skall alltid ske om arbetet förväntas ge högre bullernivåer än värdena i *tabell 2.6* och *2.7* ovan i minst följande omfattning:

- Minst två veckor innan arbetena påbörjas skall allmän information ges. Härvid anges typ av arbeten, förväntade störningar, tidsplaner, speciellt bullrande arbetsmoment, förväntade ljudnivåer etc.

- Senast dagen före vissa speciellt bullrande arbetsmoment skall ytterligare information om detta ges.

Kontrollplan

Kontroll av att beslutade gränsvärden för buller, tidsplaner etc innehålls skall ske efter en av miljöförvaltningen godkänd plan. Kontrollplanen skall innehålla:

- mätinstans (ackrediterad)
- mätpunkter, antal och läge
- mätfrekvens
- rapporteringsvägar
- åtgärdsgång vid för höga bullernivåer.

2.3.3 Tillämpning av riktvärden i Sverige

Flera jurister som specialiserat sig på miljömål har tillfrågats om rättsfall för byggbuller. Dessa har gjort vissa undersökningar men inte funnit något rättsfall rörande buller från byggarbetsplatser i Sverige. Vid vissa byggnadsarbeten har föreskrivits speciella krav på bedömningen av störningar; här ges några exempel.

■ Anläggandet av tunnel genom centrala Helsingborg

Här rådde svåra förhållanden med avseende på bullret. Kraven mildrades därför något i jämförelse med kraven i *tabell 2.5*. Följande riktlinjer gällde för samtliga byggnader utmed tunnelbygget, *tabell 2.8*:

Tabell 2.8. Högsta tillåtna ekvivalenta ljudnivå i öppet fönster, dBA.

Byggskede	Helgfri må-fre 07-18	Kväll 18-22, samt lördag och söndag	Natt 22-07
Spontning	80	55	45
Övrigt	75	55	45

För att begränsa bullerstörningar skedde överenskommelse om arbetstider för bullrande arbeten. Man kontrollerade att entreprenören höll tiderna enligt ovan, men kontroller av ljudnivåer gjordes ej. Totalt skedde spontning under ett års tid efter en sträcka av ca 2 km. Akuta störningar i en enskild byggnad uppträdde normalt 1 à 2 veckor.

■ Utbyggnad av järnvägsspår i centralt läge, Stockholm

Följande riktvärden föreslogs för högsta ekvivalenta ljudnivå L_{eq} inomhus med stängda fönster i bostäder och kontor. Vid högre nivåer föreslogs att någon form av åtgärd skulle diskuteras.

- Helgfri må-fr klockan 07-18 45dBA
- Helgfri må-fr klockan 18-22 35 dBA

- Natt 22-07 samt lördag och helgdag 25 dBA

För verksamhet med begränsad varaktighet, högst 1-2 månader, exempelvis **spontslagning, pålning, bergbörning** etc, tilläts 10 dB högre värden.

Vid enstaka kortvariga händelser, högst 5 minuter per timme, kunde upp till 15 dBA högre nivåer accepteras. Detta riktvärde var tillämpligt i samband med exempelvis ett antal passager av tunga transporter.

En kravtext som reglerar byggbullret planerades för de olika entreprenaderna. Vidare föreslogs någon form av kontrollplan, utgående från de åtgärder som planerades. Ingen konkret uppföljning av planerna har utförts.

■ *Ny väg och vägbro nära bostäder, Stockholm*

I detta projekt förekom schaktning och sprängning kvällstid på grund av att man inte skulle störa befintlig spårtrafik som passerade under dagtid. Entreprenören fick tillstånd av miljöförvaltningen och hyresgästerna reagerade på bullret. Tvisten löstes genom förlikning, då byggherren gjorde bullerdämpande åtgärder på byggarbetsplatsen för 10 % av projektets totala kostnad och hyresvärden efterskänkte en månadshyra åt hyresgästerna.

2.3.4 Riktvärden inom EU

Nedan redovisas riktvärden från följande länder:

- | | |
|-----------------|--------------|
| 1. EU generellt | 4. Tyskland |
| 2. Danmark | 5. Schweiz |
| 3. England | 6. Frankrike |

1. EU generellt

I EU-länderna gäller ett antal allmänna Council Directives för entreprenadmaskiner enligt följande:

- 79/113/EEC: On the approximation of the Member States relating to the determination of the noise emission of construction plant and equipment
- 84/532/EEC: On the approximation of the laws of the Member States relating to common provisions for construction plant and equipment

Vidare finns ett antal produktdirektiv för vissa specificerade utrustningar:

- 84/533/EEC: On the approximation of the Member States relating to the permissible sound power level of **compressors**
- 84/534/EEC: ...permissible sound power level of **tower cranes**
- 84/535/EEC: ...permissible sound power level of **welding generators**

- 84/536/EEC: ...permissible sound power level of **power generators**
- 84/537/EEC: ...permissible sound power level of **powered hand-held concrete breakers and picks**
- 86/662/EEC: On the limitation of noise emitted by hydraulic excavators, rope-operated excavators, dozers, loaders and excavator-loaders. Anm. Här finns ett tillägg kallat 89/514/EEC.

Alla produktdirektiv ovan behandlar ljudeffekt-mätningar, typgodkännande samt vilken ljudeffektnivå som är högsta tillåtna för olika maskintyper. Ännu finns inget direktiv som behandlar pål- och spontningsutrustning. Dessutom gäller det s k Maskinsäkerhetsdirektivet (89/392/EEC samt 91/368/EEC), där man säger att maskiner måste konstrueras så att hörselskaderisken minimeras, och att man ska ta hänsyn till teknisk utveckling i fråga om ljuddämpning, framförallt vid källan.

2. Danmark

Danmark har inga riktvärden gällande för enbart byggplatsbuller. Däremot finns generella riktlinjer (vägledande gränsvärden) för bullerimmission från företag i Vejledning fra miljøstyrelsen (Miljøstyrelsen: Ekstern støj fra virksomheder, Vejledning nr 5, 1984). I *tabell 2.9* återges delar av en tabell ur denna referens.

Kontrollmätningar görs utomhus, 1,5 meter över mark, i fritt fält. Ett tillägg på 5 dBA ska göras om bullret är av impulsartad karaktär eller om det innehåller hörbara toner.

I vissa fall betraktas tiden mellan klockan 06 och 07 som dagtid. Dock måste de kringboende ges möjlighet till minst 8 timmars ostörd sömn.

Riktvärden för ljudnivåerna inomhus redovisas i *tabell 2.10*.

Tabell 2.10. Danmark: Vägledande gränsvärden för buller inomhus från företag och industrier.

Användning	Högsta ekvivalenta ljudnivåer, L_{eq} i dBA		
	Dag och kväll 07-22	Natt 22 - 07	$L_{p,Max}$ dBA Natt 22 - 07
Verksamhet	50	50	-
Kontor	40	40	-
Bostäder	30	25	40

Tabell 2.9. Danmark: Vägledande gränsvärden för buller utomhus från företag och industrier.

Område	Högsta ekvivalenta ljudnivåer, L_{eq} i dBA			$L_{p,Max}$ dBA Natt
	Mån-fr 07-18	Mån-Fre 18-22	Alla dagar	
	Lör 07-14	Lör 14-22 Sön 07-22	22-07	
1. Affärs- och industriområde	70	70	70	-
2. Affärs- och industriområde med förbud mot störande verksamhet	60	60	60	-
3. Blandat affärs- och bostadsområde	55	45	40	55
4. Flerfamiljshus	50	45	40	55
5. Småhusområde	45	40	35	50
6. Fritidshus och rekreationsområde	40	35	35	50

3. England

I England kan en entreprenör inför ett grundläggningsprojekt ansöka om samtycke, "consents", från lokala myndigheter. Han presenterar då vilka störningar som kommer att uppstå under tiden arbetet pågår och vad som görs för att minimera störningar till omgivningen. Myndigheten kan godkänna ansökan med eller utan krav på ytterligare åtgärder. Om entreprenören etc finner kraven orimliga kan han överklaga till högre instans. När samtycke sökts och godkänts kan myndigheterna inte stoppa arbetet om kraven i samtycket efterlevs. Privatpersoner kan dock fortfarande agera om de störs av arbetet.

Om samtycke inte söks före arbetets start kan myndigheterna i efterhand gå in och lägga krav på vilka störningar till omgivningen som är acceptabla. Det ligger alltså i entreprenörens intresse att tillse att ett samtycke finns och har godkänts innan offerter lämnas in eftersom kraven i samtycket kan påverka hur arbetet skall utföras.

Gränsvärden sätts av lokala myndigheter och baseras på omgivning och förutsättningar i varje enskilt fall. Ett riktvärde är $L_{eq} = 75$ dBA utomhus i stadsbebyggelse.

4. Tyskland

1965 kom en förordning i Nordrhein-Westfalen som begränsade tillåtna ljudnivåer från byggmaskiner i tätbebyggelse till 75 dBA på 7 meters avstånd. Mätning skall ske vid tomgång och efter anvisad metod.

1989 kom bedömningsgrunder för buller i grannskapet (VDI 3723 Bl 2 E, 1989).

Vidare finns riktlinjer för mätning av bulleremission från byggmaskiner (Bundes und landesvorschriften zum Schutz gegen Baulärm, 1971) och riktvärden för tillåtna immisionsnivåer, (Bundes und lan-

desvorschriften zum Schutz gegen Baulärm, 1976). Immissionsgränsvärdena kontrolleras genom mätning; antingen 0,5 m utanför öppet fönster i det fönster där nivån är högst, eller (om området intill arbetsplatsen är obebott men planerat för bebyggelse) 3 m från gränsen till arbetsplatsen, 1,2 m ovan mark. Gränsvärden anges i *tabell 2.11*.

Tabell 2.11. Tyskland: Immissionsgränsvärden, ekvivalent ljudnivå L_{eq} i dBA.

Område	kl 07-20	kl 20-07
a) Enbart industrier	70	70
b) Mest industrier	65	50
c) Ungefär lika andelar industrier och bostäder	60	45
d) Mest bostäder	55	40
e) Enbart bostäder med få undantag	50	35
f) Sjukhus- och kurområden	45	35

5. Schweiz

I Schweiz har förslag till riktvärden för högsta tillåtna byggbullernivåer givits som vägledning till kommunerna. Riktvärdena är differentierade i avseende på bebyggelsestyp och längden av byggtiden. Se *tabell 2.12* från Lärmbekämpfung im Baubetrieb, Schweiz.

Värdena gäller för mätning i öppet fönster i närast belägna hus.

I flera större schweiziska städer har polisen avdelat särskild personal som enbart kontrollerar byggbuller. Det är inte ovanligt att bygglämpligheter stängs.

Tabell 2.12. Schweiz: Högsta tillåtna ekvivalenta ljudnivå L_{eq} i dBA.

Zon	I	II	III
	Byggarbeten som pågår mindre än 1 månad	Byggarbeten som pågår 1-6 mån	Byggarbeten som pågår mer än 6 mån
Sjukhuszon	70	65	60
Lugn bostads- och skolzon	75	70	65
Blandzon och affärzon	85	80	75
Industri- och huvudvägzon	90	85	80

6. Frankrike

I Frankrike finns inga immissionsnormer beträffande byggbuller. Däremot finns krav på maximal ljudniveå från bullrande maskiner som används på byggarbetsplatsen. Dessa maskiner - t ex kranar, kompressorer, kraftaggregat, traktorer m m - erhåller ett certifikat, som medger att maskinen får användas.

7. Finland

I Finland arbetar man efter en äldre bullerbekämpningslagen, som innehåller Allmänna riktlinjer. Dessa avser framförallt trafikbuller och externt industribuller, men tillämpas även för byggbuller. Enligt bullerbekämpningslagen har byggaren en anmälningsskyldighet gentemot den lokala kommunen. Olika kommuner kan ha olika lokala riktlinjer.

De allmänna riktlinjerna innehåller bland annat högsta rekommenderade ekvivalenta ljudnivå för dag respektive natt i bostäder. Någon rekommendation avseende maximal ljudnivå inomhus nattetid finns för nuvarande ej.

1992 kom Statsrådets beslut om riktvärden för bullernivå, med riktvärden utomhus enligt *tabell 2.13*.

Tabell 2.13. Finland: Generella gränsvärden för ljudnivå utomhus från byggverksamhet, industri och trafik.

Område	Högsta ekvivalentnivån, L_{eq} i dBA	
	under dagen (kl 7-22)	nattetid (kl 22-7)
Bostadsområden, rekreationsområden i tätorter eller dess omedelbara närhet och i områden avsedda för vårdinrättningar eller läroanstalter	55	50
Nya bostadsområden	55	45

Inomhus gäller *tabell 2.14*:

Tabell 2.14. Finland: Generella gränsvärden för ljudnivå inomhus från byggverksamhet, industri och trafik.

Lokaltyp	Högsta ekvivalentnivån, L_{eq} i dBA	
	under dagen (kl 7-22)	nattetid (kl 22-7)
Bostadsrum, patientrum och inkvarteringsrum	35	30

Man kräver en addering av mät- eller beräkningsvärdet med 5 dB om ljudet till sin karaktär är slagartat eller smalbandigt.

2.3.5 Riktvärden i övriga länder

I nedanstående punkter finns riktvärden från följande länder:

1. Japan
2. Hongkong
3. Singapore
4. Norge
5. USA

1. Japan

Japan var ett av de första länderna att sätta gränsvärden för buller och vibrationer från pålning. Första bullerkraven sattes av "Environment Agency" 1968 (Noise Regulation Law) och vibrationskrav 1976 (Vibration Regulation Law). I reglerna finns vissa typer av utrustning specificerade som ljud- och vibrationskällor ex pålning utom då jordbör eller hydraulisk press används för neddrivning. I *tabell 2.15* anges högsta tillåtna ljudtrycksnivå L_p i dBA och vibrationsaccelerationsnivå L_a i dB rel 10^{-6} m/s² vid arbetsplatsens gräns.

Brott mot ovanstående kan ge upp till 1 års fängelse, 100000 yen (buller) 500000 yen (vibrationer) i böter.

2. Hongkong

Environmental Protection Department har ställt upp krav i (Technical Memorandum on noise from Percussive Piling Environmental Protection, Departm. Hong Kong, 1991). Man skiljer alltså på buller från slående pålning och annat byggbuller. Förutom gränsvärden finns en föreskriven modell för att först beräkna ljudnivåer och därefter tillåten längsta arbetstid i timmar per dygn om gränsvärdena överskrids. Vid varje projekt där slående pålning kommer att användas skall en beräkning av ljudnivån utföras, varefter ett tillstånd ges av myndigheterna med ev. tidsbegränsningar

Tabell 2.15. Japan: Gränsvärden för högsta tillåtna ljud- och vibrationsnivå vid arbetsplatsgräns.

Område	Högsta L_p , dBA ref	Högsta L_a , dB ref	Förbjuden arbetstid	Längsta arbetstid, tim/dygn	Längsta arbetstid, dag/vecka	Förbjudna arbetsdagar
Bostadsområden där en lugn miljö eftersträvas	85	75	kl 19-07	10	6	Sön- och helgdag
Område med både bostäder och industrier	85	75	kl 22-06	14	6	Sön- och helgdag

Värdena i *tabell 2.16* gäller ekvivalent ljudnivå L_{eq} i dBA under en 5 minuters period mätt 1 m framför fasad för byggnader typ; bostäder, kontor, hotell, sjukhus skolor, helgedomar, bibliotek, domstolar, konstcenter.

Tabell 2.16. Hongkong: Gränsvärden vid bostäder, kontor etc för buller från slående pålning. Avser 5 min mättid.

Typ av byggnad	Högsta ljudnivå L_{eq} , dBA, 1 m framför fasad
Utan fönster eller andra öppningar	100
Med luftkonditionering	90
Med fönster eller öppningar men utan luftkonditionering	85

För byggnader av ovanstående typer som av myndigheterna bedöms som extra känsliga för bullerstörningar skärps kraven 10 dBA.

I *tabell 2.17* anges längsta tillåtna arbetstid beroende på hur mycket tillåten ljudnivå beräknas överskridas.

Tabell 2.17. Hongkong: Begränsning i arbetstid vid överskridande av bullergränsvärden.

Överskridande	Tillåten arbetstid för icke helgdagar
Mer än 10 dBA	kl 08.00-09.00, 12.30-13.30 och 17.00-18.00
Mellan 1 dBA och 10 dBA	kl 08.00-09.30, 12.00-14.00 och 16.30-18.00
Inget överskridande	kl 0700-1900

När det gäller vibrationer finns inga riktlinjer; man brukar dock tillämpa en gräns för vibrationshastigheten L_v vid järnvägar på 15 mm/s. För känsliga byggnader kan gränserna sänkas beroende på byggnadens skick.

3. Singapore

Pålning bedöms på samma sätt som övrigt byggbuller. Riktlinjer finns i Environmental Public Health Act, Control of Noise from Construction sites, Regulation 1990. Kontroll sker genom mätningar utförda av "public health officers" som föreskrivs i riktlinjerna. I *tabell 2.18* anges gränsvärden för ljudnivåer utanför byggnad.

4. Norge

I Forskrifter om begränsning av støy (Oslo helseråd: Foreskrifter om begränsning av støy, 1973) anges gränser för tillåten ljudnivå från byggnads- och anläggningsverksamhet i Oslo.^{1) 2)} Se *tabell 2.19*.

Tabell 2.19. Norge: Gränsvärden L_{eq} dBA för buller från bygg- och anläggningsverksamhet.

Årstid	Dag	Kväll	Natt
Sommar 16/5-15/9	kl 06-18	kl 18-22	kl 22-06
Vinter 16/9-15/5	L_{eq}	L_{eq}	L_{eq}
Bostäder³⁾			
Sommar	70	65	55
Vinter	70	65	60
Sjukhus			
Sommar	50	50	Förbud mot bullrande verksamhet
Vinter	55	55	
Skolor⁴⁾			
Sommar	60	60	Ingen gräns
Vinter	65	65	
Kontor, affärer, industri	70	Ingen gräns	Ingen gräns
Hela året			

¹⁾ Tabellen gäller ej impuls ljud

²⁾ För kortvariga arbeten på dagtid görs följande korrigeringar: För arbeten som pågår kortare tid än en vecka kan 5 dBA högre värden tillåtas. För arbeten som pågår kortare tid än två timmar per dag kan 5 dBA högre värden tillåtas. Om arbetena pågår under kväll eller natt kan korrigeringarna ovan ej tillämpas.

³⁾ I bostadsområden får bullrande byggverksamhet inte förekomma mellan kl 23 och 01. Denna period kallas "stilla period", och är för många en insomnandetid.

⁴⁾ För skolor finns inga restriktioner i samband med lov.

Tabell 2.18. Singapore: Riktlinjer för byggbuller vid fasad.

Byggnadstyp	Högsta ekvivalenta ljudnivå L_{eq} dBA, under en 12 timmars period		Högsta ekvivalenta ljudnivå L_{eq} dBA, under en 5 minuters period	
	kl 07 - 19	kl 19 - 07	kl 07 - 19	kl 19 - 07
Sjukhus, skolor, institutioner för högre utbildning, hem för äldringar, sjuka, etc.	60	50	75	55
Övriga typer av byggnader	75	65	90	70

Ljud av typen slående hammare anses vara 5 dBA mer störande än det mätta värdet. Arbeten som orsakar impuls ljud (t ex sprängning, fallhejare m m) får ej företas i de områden under de tider som har ljudnivåbegränsningar i tabellen ovan. Undantag kan medges av Helserådet.

Alla ljudnivåer ovan avser ljudnivåmätningar antingen 0,5 m framför ett öppet fönster eller 3,5 - 4 m framför fasad 1,3 - 1,5 m ovan mark. Mätningen ska utföras med integrationstid "Fast".

Helserådet medger dispenser till exempel om arbetet av olika skäl måste utföras under viss tid på dygnet.

Dispens kan också ges då bakgrunds-nivån är så hög att gränsvärdena i tabellen ovan ej är tillämpliga. I sådana fall kan Oslo helseråd tillåta ljudnivåer 5 dBA över bakgrunds-nivån.

6. USA

Enligt Noise Ordinance, San Francisco 1972, gäller att man ej får höja ljudnivån med mer än 5 dBA över bakgrunds-nivån på närmaste grann-tomt mellan kl 20 och 07. Stationära maskinella anordningar får ej bullra mer än 50 dB(A) nattetid och 55 dBA dagtid. Här avses maximal ljudnivå på 30 m avstånd.

2.4 INVERKAN PÅ UTRUSTNING I BYGGNADER

2.4.1 Känslig utrustning

Känslig utrustning är till exempel datorer med kringutrustning och laboratorieutrustning som elektronmikroskop, masspektrometrar, precisionsvågar. I industrin även precisionsmätutrustning, till exempel för mätning av ythjälp.

Myndighetskrav

I allmänhet finns inga myndighetsregler för tillåtna vibrationsnivåer i byggnader med avseende på känslig utrustning. Enda undantagen som framkommit är Australien och England.

Standards Association of Australia ASCA 23 - 1967, anger gränsvärdet för vibrationer i byggnader med känslig utrustning till v_r högst 15 mm/s. v_r är resulterande vibrationshastighet, $v_r = (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)^{1/2}$, där v_x , v_y , v_z är max vibrationshastighet i resp. huvudriktning. Anm: DIN 4150 rekommenderar att v_r beräknas ur enskilda maxvärden för resp. riktning, dvs de behöver inte inträffa samtidigt.

Enligt Massarch (1991) tillämpas följande riktvärden i Sverige (tabell 2.20) för byggnader på berg utsatta för vibrationer från sprängning. Gäller vibrationernas toppvärden ("peak"):

Tabell 2.20. Riktvärden tillämpade i Sverige för tillåtna vibrationer från sprängning, i lokaler med känslig utrustning.

Utrustning	Acceleration (mm/s ²)	Hastighet (mm/s)
Uppställningsplats för datorer	0,1	2,5
Relästationer		0,5 - 2,0

Tillverkardata

De allra flesta tillverkare av stordatorer har gränsvärden för högsta tillåtna vibrationsnivåer under transport, nivåer som stör funktionen samt nivåer som permanent skadar utrustningen.

De gränsvärden som anges av tillverkarna är ofta svåra att tolka, olika storheter används och man har inte specificerat hur nivåerna skall kontrolleras och för vilka riktningar de gäller. I Appendix 14 "Definition av enheter" finns en omvandlingstabell för de vanligast förekommande storheterna. För att vibrationskraven skall vara möjliga att kontrollera skall följande vara specificerat:

- Gränsvärdet gäller: vibrationstålighet vid transport, driftsstörningar, risk för permanenta skador under drift, utan drift etc
- Mätpunktsplacering: på golv, i byggnadsstommen eller på utrustningen
- Kravstorhet: amplitud, hastighet eller acceleration
- Vibrationsriktning: x, y, z
- Mätvärde avser: zero-peak, peak-peak, r.m.s
- Enhet: dB, mm/s, g etc
- Frekvensområde:
- Tolkning av kravet: högsta totalnivå inom frekvensintervallet som angivits alt bandbredd som kravkurvan gäller för.

Vid pålningsarbeten till exempel intill större datoranläggningar bör man tillsammans med leverantören upprätta ett kontrollprogram som bl a anger aktuella gränsvärden och preciserar mätförfarande. Då massan hos större utrustningar kan påverka vibrationsnivån i lätta installationsgolv bör provmätningar utföras med utrustningen på plats alt. med en motsvarande tyngd. Det har inträffat att skador uppstått även vid vibrationer lägre än de som angivits av leverantören. För att undvika tvister är det därför viktigt att i förväg vara överens om hur kontrollmätningar utförs.

I Boyle (1990) anges följande generella gränsvärden för datorer av fabrikat IBM, HP, ICL, NCR. Värdena gäller peakvärden (zero-peak i golv där utrustningen är placerad.

Tabell 2.21. Generella vibrationsgränsvärden för datorer typ IBM, HP, ICL, NCR.

Typ av vibration	Högsta zero-peakvärde för störningsfri drift, accel. i g (9,81 m/s ²)	Högsta zero-peakvärde för skaderisk, accel i g (9,81 m/s ²)
Kontinuerlig (gäller frekv 5 Hz - 500 Hz)	0,2g - 0,25g	0,5g
Stokastisk (gäller frekv 5 Hz - 500 Hz)	0,3g	2,7g
Stöt (varaktighet < 11ms)	3g	

Digital Equipment Svenska AB har lämnat följande gränsvärden:

Tabell 2.22. Vibrationsgränsvärden för datorer från Digital Equipment.

Typ av vibration	Högsta peakvärde för störningsfri drift, accel. i g (9,81 m/s ²)
Kontinuerlig (5 Hz - 22 Hz)	0,01g
Kontinuerlig (22 Hz - 500 Hz)	0,25g
Stöt (varaktighet < 11ms)	10g

Hewlett Packard, Sverige AB har angivit följande gränsvärden för sina hårddiskminnen:

Tabell 2.23. Vibrationsgränsvärden för hårddiskar från HP.

Typ av vibration för	Högsta peakvärde, accel. i g (9,81 m/s ²) för skade- för skade- störnings- risk under risk utan fri drift, drift drift		
Kontinuerlig (gäller frekv 5 Hz - 500 Hz)	0,25g	0,5g	2,0g
Stöt (varaktighet < 11ms)	3g	10g	50g

En undersökning har gjorts där ett stort antal mätvärden från olika datortillverkare sammanställts. Spridningen är stor, den tåligaste utrustningen klarar 10 - 20 ggr högre acceleration än den känsligaste. Det går alltså inte att ställa upp generella gränsvärden för datorer baserat på ovanstående. Man kan dock få en fingervisning på om man ligger nära riskzonen och bör begära data från tillverkaren.

Enligt BS5228 (1992) har man i en undersökning kommit fram till högst tillåtna vibrationshastighet 5 mm/s (peak) för telefonväxlar av äldre typ.

2.4.2 Riktvärden i Sverige

Det finns i Sverige inga lagar som reglerar tillåten vibrationsnivå från pålning eller byggnadsarbeten. Kravnivåerna sätts från fall till fall av lokala myndigheter beroende på aktuella omständigheter.

I Sverige skall SS 460 48 61, "Vibration och stöt - Mätning och bedömning av komfortstörningar i byggnader" tillämpas. (SEK Svenska Elektriska Kommissionen, 1992).

Standarden gäller både kontinuerliga vibrationer och stöt. Mätförfarande beskrivs och i en rådgivande bilaga anges riktvärden för bedömning av komfort. Vibrationer skall mätas på de platser och i de riktningar där högsta nivåer uppträder, vanligtvis i z-riktning mitt på golv.

Bedömningen baseras på maximala, frekvensvägda accelerationer eller hastigheter i området 1 - 80 Hz med integrationstid "Slow". Frekvensvägningen görs enligt ISO 2631-2 kurva 4a resp 4b för blandade riktningar.

2.4.3 Tillämpning av riktvärden i Sverige

1. Anläggning av tågtunnel genom Helsingborgs centrum

Vid anläggningen av tågtunnel genom Helsingborgs centrum användes riktvärden. Kraven var satta med avseende på vibrationskänslig utrustning.

För stötar användes följande:

- Max acceleration 2 g (19,6 m/s²)
- Max varaktighet 10 ms
- Max antal 2 st/sekund

Vibrationskraven innebar att slående utrustning inte fick användas på konstruktioner vilka var fast förbundna med intilliggande byggnader.

2.4.4 Riktvärden utomlands

Även utanför Sverige är lagstiftade gränsvärden för vibrationers påverkan på människan sällsynta. För följande länder har dock värden framkommit.

1. EU
2. Danmark
3. Japan

1. EU

Inom EU gäller mät- och bedömningsstandarden; ISO 2631-2 "Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz)". Den är dock endast rådgivande när det gäller vibrationskriterier.

Koordinatssystemet refererar till människan, med z-axel längs ryggrad, x-axel ut från bröstorg och y-axel ut från vänster sida av bälten. Mätningar skall utföras i den riktning som har störst vibrationer och i den punkt de överförs till människan. Är människans position alltid densamma jämförs med gränsvärden för aktuell riktning. Om olika positioner intas skall värdena för kombinerade riktningar användas.

Frekvensvägningen görs enligt ISO 2631-2. Följande grundvärden gäller för acceleration resp. hastighet för vägda RMS-nivåer:

Tabell 2.24. EU: Gränsvärden för vibrationer som människan utsätts för. RMS-nivåer vägda enligt ISO 2631-2.

	z- riktning	x eller y -riktning	Kombinerad riktning
Acceleration RMS (m/s ²)	0,005	0,0036	0,0036
Hastighet RMS (mm/s)	0,0995	0,287	0,0995

I allmänhet kan högre värden accepteras vid tidsbegränsade störningar som bygg- och anläggningsarbeten.

I standardens Annex A finns viktfactorer att multiplicera med grundvärdena, beroende på lokaltyp och tid på dygnet, se sid 33.

2. Danmark

I Nyt fra Miljøstyrelsen, NFM 2/1983 finns riktvärden som gäller i Danmark för störande vibrationer i byggnader. Värdena redovisas i *tabell 2.25* och avser frekvensvägda RMS-nivåer. (Vägning enligt ISO 2631-2)

Tabell 2.25. Danmark: Riktvärden för vibrationer i byggnader. RMS-nivåer enligt ISO 2631-2.

Typ av område	Frekvensvägd acceleration a_w , mm/s ²
Bostäder i rena bostadsområden	5,6
Bostäder i områden med både bostäder och affärslokaler	10
Kontor/affärslokaler	17,8

Avsteg med en faktor $\pm 0,8$ ggr angivet gränsvärde kan göras om vibrationerna förekommer sällan, < 3 händelser/dygn eller vid kortvariga anläggningsarbeten < 1 mån.

3. Japan

Japan har enligt avsnitt 2.3.5 gränsvärden för buller och vibrationer från pålning. I *tabell 2.15* anges högsta tillåtna vibrationsaccelerationnivå L_a i dB rel. 10^{-6} m/s² vid arbetsplatsens gräns.

Kapitel 3.

Överföring av vibrationer i jorden från källan till skadeobjektet

3.1 INLEDNING

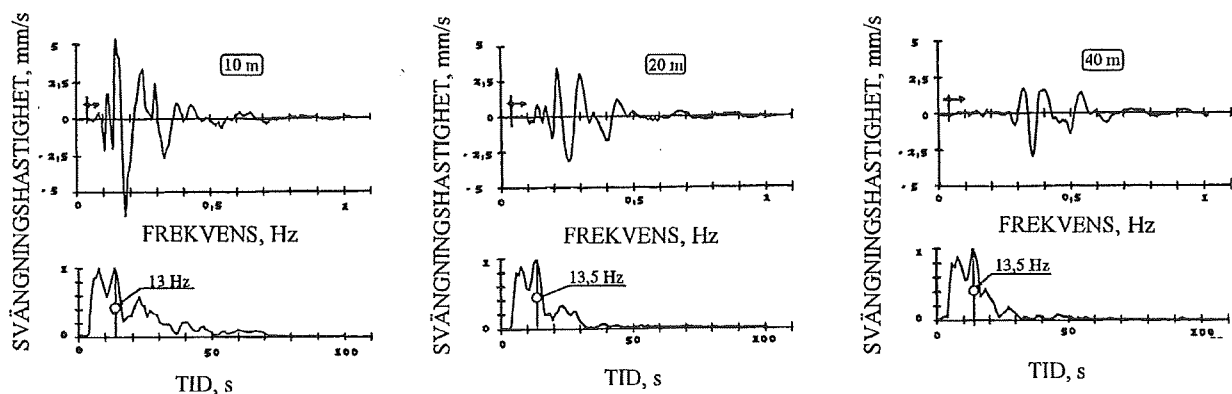
Vid slagning av pålar eller spont uppstår i störningsskällans närområde permanenta, plastiska deformationer. I friktionsjord kan dessa leda till jordpackning och i kohesionsjord till jordundantäckning. Utanför störningsskällans närområde, på ett avstånd större än ungefär en pållängd, framkallar förskjutningarna huvudsakligen temporära, elastiska förskjutningar. De elastiska deformationers storlek (amplitud), varaktighet och rörelseriktning påverkas av ett flertal faktorer, som störningsskällans dynamiska egenskaper (hejarens massa och fallhöjd, antalet slag, slagets intensitet och varaktighet), pålens eller spontens material-egenskaper och form (längd och tvärsnitt) samt de omgivande jordlagrens mäktighet och geodynamiska egenskaper. Vibrationers utbredning i jord i samband med byggverksamhet behandlas i bl a Holmberg (1982), och Massarsch (1984).

3.1.1 Definitioner och begrepp

Definitions-mässigt skiljer man mellan vibrationer och stöt. Vibrationer definieras som återgående svängningsrörelser kring ett jämviktsläge. Stöten innebär en kortvarig och plötslig ändring i ett system. En partikels svängningsrörelse kan beskrivas om man känner till svängningsrörelsens frekvens samt vibrationsamplituden (partikelns förskjutning, partikelhastighet eller acceleration). Figur 3.1 visar resultat av vibrationsmätningar i markytan vid pålslagning på olika avstånd, Nilsson (1989). Svängningsförloppet har registrerats med partikelhastigheten som storhet (tidsdomän). Samma svängningsrörelse kan också redovisas i frekvensdomän, varav svängningsrörelsens dominerande frekvens framgår. I frekvensdomän används alltid enkelamplituden. I vissa fall tillämpas dock begreppet "topp till topp värde", dvs avståndet mellan amplitudens extremvärden, som kan leda till förväxlingar.

Det är viktigt att skilja mellan partikelns partikelhastighet v , och vågfrontens utbredningshastigheten c . Med hjälp av vågutbredningshastigheten c och svängningsfrekvensen f kan våglängden λ beräknas

$$\lambda = c / f \quad (3.1)$$



Figur 3.1. Resultat av vibrationsmätningar i tids- och frekvensdomän, efter Nilsson (1989).

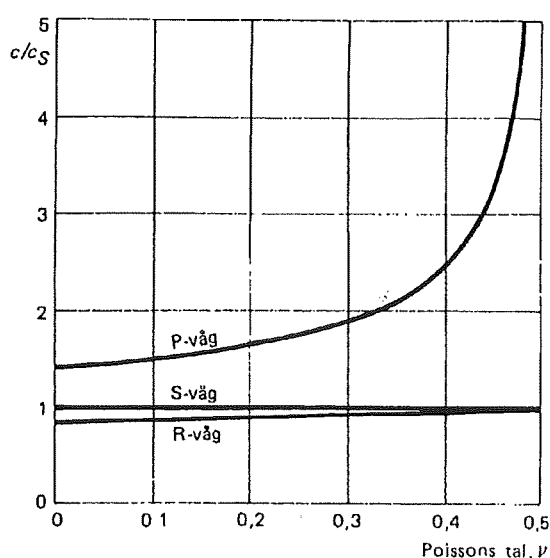
3.1.2 Vågutbredning i jord

Trots att pål- och spontslagning ger upphov till huvudsakligen vertikala svängningar vid störningskällan, innehåller såväl volymvågorna som ytvågorna horisontala svängningskomponenter.

Vågutbredningen sker delvis genom kornskelettet och delvis genom vätskan i porerna. P-vågen kan fortplanta sig såväl genom vätskan som genom de fasta partiklarna. S-vågen däremot kan endast utbreda sig genom kornskelettet, eftersom vatten inte kan överföra skjuvkrafter. Sambandet mellan P-, S- och R-vågors utbredningshastighet visas i *figur 3.2*.

Då jordlager ofta är skiktade blir ytvågorna (R- och L-vågor) dispersiva, dvs våghastigheten är frekvensberoende. Detta har som konsekvens att vågens dominerande frekvens kan förändras i samband med utbredningen genom skiktade jordlager.

Svängningsamplituden avtar med ökande avstånd från vibrationskällan. Detta beror dels på att alla jord- och bergarter uppvisar en viss grad av materialdämpning, dvs att energi förbrukas vid varje svängningscykel. Den andra orsaken är geometrisk dämpning, som innebär att vibrationsenergin vid vågutbredningen sprider sig över en allt större jordvolym. Ytvågor (R- och L-vågor) dämpas långsammare än volymvågor (S- och P-vågor) eftersom den geometriska dämpningen är lägre vid gränsskiktet. Därför har i många fall ytvågor den största praktiska betydelsen.



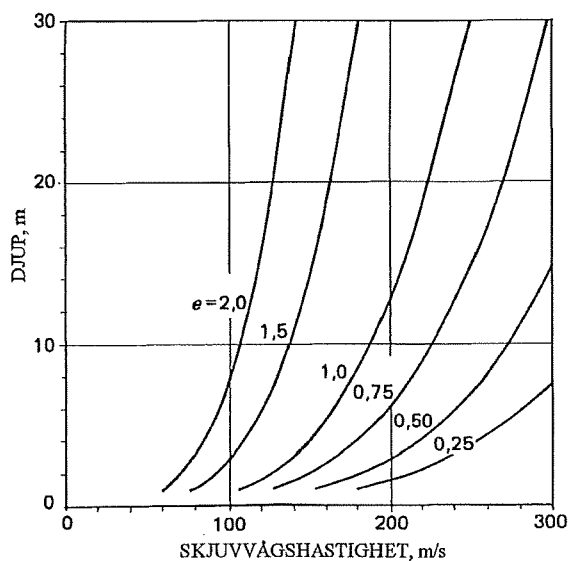
Figur 3.2. Samband mellan elastiska vågors utbredningshastighet C och Poissons tal ν , där c_s är skjuvvågshastigheten.

3.1.3 Jords dynamiska egenskaper

De viktigaste geodynamiska faktorerna vid analys av vibrationsproblem är vågutbredningshastigheten c , Poissons tal ν och materialdämpningen D . Dessa parametrar kan bestämmas genom fält- och laboratorieförsök eller beräknas genom empiriska samband, Massarsch (1984). I *figur 3.3* visas den teoretiskt beräknade variationen av skjuvvågshastigheten som funktion av djupet och portalet e , Massarsch (1984). Därav framgår att skjuvvågshastigheten är starkt beroende av portalet samt att den ökar markant med djupet.

Typiska värden på våghastigheter och Poissons tal ν för olika jordarter samt för vatten ges i *tabell 3.1*. R-vågshastigheten är ca 10 % lägre än S-vågshastighet.

Alla material förbrukar energi då de deformeras. Detta fenomen kallas dämpning och kan förorsakas av exempelvis friktionen mellan jordpartiklarna eller visko-elastiska effekter. När vågor utbreder sig i jordlager minskar vibrationsenergin dels genom materialdämpning, dels genom geometrisk dämpning. Dämpkvoten D (som återspeglar materialdämpningen) uttrycks i procent av den kritiska dämpningen. Vid små, elastiska deformationer är materialdämpningen i ler- och sandjordar av storleksordningen 3 - 6 %.



Figur 3.3. Samband mellan skjuvvågshastigheten, portal e och jordlagermäktighet för normalkonsoliderad, vattenmättad jord, Massarsch (1984)

Tabell 3.1. Typiska värden på P- och S-vågshastigheter i olika jordarter och vatten

JORDART	P-VÅGSHASTIGHET m/s	S-VÅGSHASTIGHET m/s	POISSONS TAL
Lera	1 500	50 - 100	0,45 - 0,5
Sand (torr)	1 500 (200 - 600)	100 - 300	0,25 - 0,35
Morän	600 - 1 800	300 - 600	0,40 - 0,50
Berg	2 500 - 6 000	600 - 3 000	0,40 - 0,50
Vatten	1 500	—	—

3.2 PÅLSLAGNING

3.2.1 Hejare

Vid pålslagning med en fallhejare överförs hammarens energi ($mv^2/2$) genom stötimpulser via dynan till pålskallen. En del av slagenergin dämpas genom dynan, en del förloras i kontaktytan mellan dynan och pålskallen. Vid varje slag accelereras pålen ur viloläget, som innebär att tröghetskrafterna samt jordens mantel- och spetsmotstånd måste övervinnas.

Pål- och spetslagning med en vibrationshejare skiljer sig från slagning med fallhejare. Vibratorn är fast förbunden med pålen och pålskallen utsätts för en kontinuerlig oscillerande rörelse. Denna pulserande kraft håller hela pålen i en svängningsrörelse, varigenom mantelmotståndet minskar. Moderna vibratorers frekvens kan varieras och vibrationsfrekvensen ligger normalt mellan 25-45 Hz. Under senare tid har kraftfulla vibratorer utvecklats där vibrationsfrekvens och den dynamiska kraften kan varieras kontinuerligt under pål- eller spetslagningen. Genom variation av vibratorns frekvens och amplitud kan resonans- och förstärkningseffekter vid arbeten nära vibrationskänsliga byggnader eller installationer undvikas.

3.2.2 Påle

Impulsen som genereras vid slagning med fallhejare framkallar en stötvåg i pålen som fortplantar sig från pålskallen till spetsen. Pålen uppför sig som en elastisk stav genom vilken den longitudinella stötvågen passerar. Stötkraften P beror på pålmaterialets impedans, Z och pålens partikelhastighet, v

$$P = Z \cdot v = \rho \cdot c \cdot A \cdot v \quad (3.2)$$

där ρ är pålmaterialets densitet, c är våghastigheten och A är pålens tvärsnittsarea. Betydelsen av pålens impedans för vibrationsöverföringen till omgivning- en (markvibrationers intensitet) framgår av *figur 3.4*. Heckman & Hagerty (1978) har genomfört omfattan-

de vibrationsmätningar vid slagning av olika påltyper. Resultat av deras mätningar visar att pålens impedans har avgörande betydelse för vibrationsöverföringen från pålen till den omgivande jorden. En minskning av pålimpedansen med 50 % kan leda till en ökning av vibrationsintensiteten med flera hundra procent, jämför *figur 3.4*.

3.2.3 Samverkan påle - jord

För att pålen skall kunna penetrera i jorden måste varje impuls vara så stark att mantel- och spetsmotståndet kan övervinnas. I pålens omedelbara närhet uppstår plastiska deformationer, men redan på ett avstånd av ca 10 påldiametrar utbreder sig svängningsenergin i form av elastiska vågor. *Figur 3.5* åskådliggör på ett förenklat sätt vilka vågtyper som kan uppstå vid pålslagning.

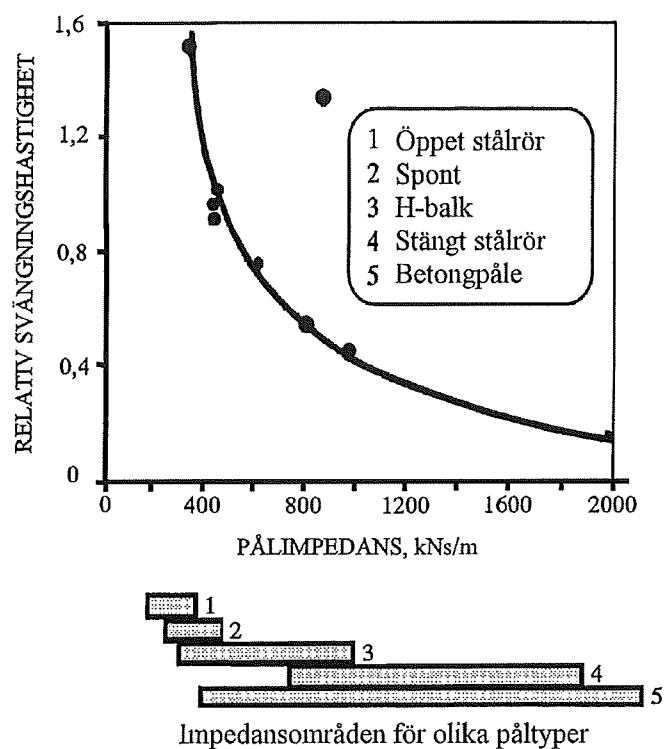
Slagenergin utnyttjas för att övervinna pålens spets- och mantelmotstånd. Vibrationskällans läge (pålspets och/eller mantelyta) påverkas av flera faktorer såsom slagningsmetod, pålens dynamiska egenskaper och jordlagerföljd. Pålspetsen ger upphov till P- och S-vågor, som sprider sig i form av sfäriska vågfronter i alla riktningar. P- och S-vågorna fortplantar sig med olika utbredningshastigheter. Enligt Martin (1980) kan pålens mantelmotstånd leda till utbredning av en konisk vågfront. Den största delen av vågenergin utbreder sig dock som R-vågor i en zon nära markytan.

3.3 VÅGUTBREDNING

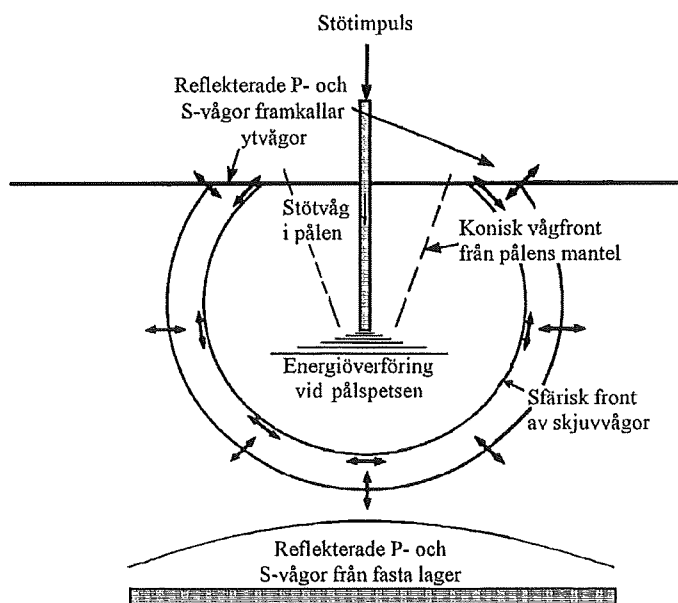
3.3.1 Avståndsdämpning

Vågenergin minskar normalt med ökande avstånd från pålen. Detta beror dels på den tidigare nämnda materialdämpningen, dels på spridningen av vågenergin över en allt större jordvolym (geometrisk dämpning).

Spridningen av vågenergin från en punktkälla kan beskrivas matematiskt genom följande samband



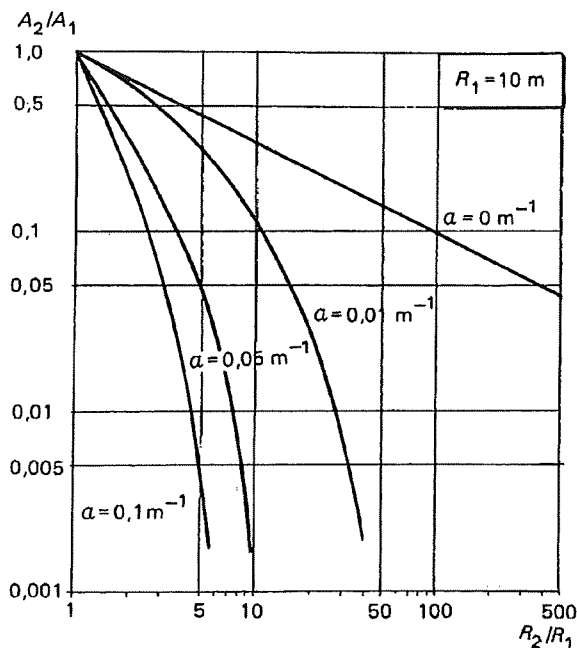
Figur 3.4. Inverkan av pålens dynamiska styvhet på vibrationsöverföringen till omgivningen. Efter Heckman & Hagerty (1978).



Figur 3.5. Schematisk beskrivning av olika vågtyper som kan uppstå vid påslagning, efter Martin (1980).

$$A_2 / A_1 = (R_2 / R_1)^{-n} \cdot (e^{-\alpha(R_2 - R_1)}) \quad (3.3)$$

där A_1 och A_2 är vibrationsamplituder på avstånd R_1 respektive R_2 . Sambandet åskådliggörs i figur 3.6 för ett referensavstånd $A_1 = 10$ m.



Figur 3.6. Avståndsdämpning vid olika absorptionskoefficienter a , referensavstånd $A_1 = 10$ m, Massarsch (1984).

Exponenten n beror på vågtypen enligt nedanstående tabell 3.2. Avståndet måste räknas från vibrationskällan till mätpunkten. Detta innebär att man vid en vibrationsprognos måste uppskatta avståndet från vibrationskällan under hela slagningsförloppet. Det kan vara svårt, eftersom vibrationer kan genereras samtidigt längs pålens mantelyta och vid pålspetsen. De geotekniska förutsättningarna har därför stor betydelse för källan av vibrationsutbredningen vid påslagning (spets- resp. mantelmotstånd).

Tabell 3.2. Exponenten n för olika vågtyper.

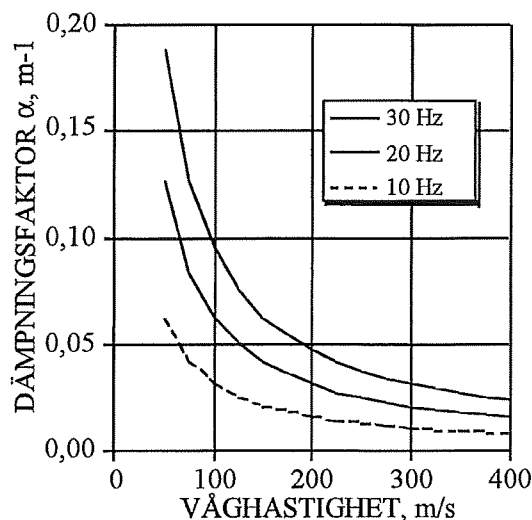
VÅGTYP	EXPONENT n
P- och S-vågor	1,0
P- och S-vågor i markytan	2,0
R-vågor	0,5

Dämpningsfaktorn α , som också kallas absorptionskoefficient, återspeglar jordpartiklarnas dämpningsegenskaper och beror på flera faktorer enligt sambandet

$$\alpha = (2 \pi D f) / c \quad (3.4)$$

med beteckningarna: våghastigheten c , materialdämpningen D och frekvensen f . Sambandet enligt ekvation 3.4 åskådliggörs i figur 3.7.

Av figur 3.7 framgår att vibrationsenergin dämpas snabbare vid högre frekvenser och vid minskande våghastighet. Dämpningsfaktorn är således ingen materialkonstant utan måste bestämmas med avseende på de rådande förhållanden på pålningsplatsen.



Figur 3.7. Inverkan av våghastigheten c och svängningsfrekvensen f på dämpningsfaktorn α .

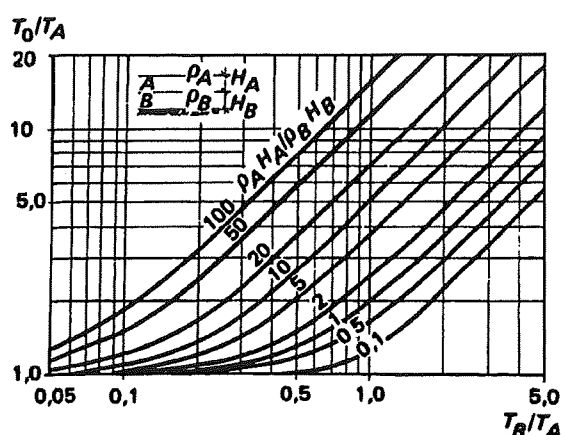
3.3.2 Resonanseffekter

Vid påslagning kan resonanseffekter uppstå. Vid slagning med fallhejare framkallas alltid jordlagrets egenfrekvens samt dess olika övertoner. Den lägsta egenfrekvensen f_0 av ett homogent jordlager, samt dess övertoner f_n , kan beräknas enligt följande samband

$$f_n = \frac{c}{4H} m \quad (3.5)$$

där c är vågutbredningshastigheten, H är jordlagrets mäktighet och $m = 1, 3, 5, \dots$ en faktor. Om undergrunden består av skikt med varierande densitet ρ_A respektive ρ_B så kan den dominerande frekvensen beräknas överslagsmässigt med hjälp av figur 3.8, Massarsch (1984).

$$T_0 = \frac{4H}{c} \quad (3.6)$$



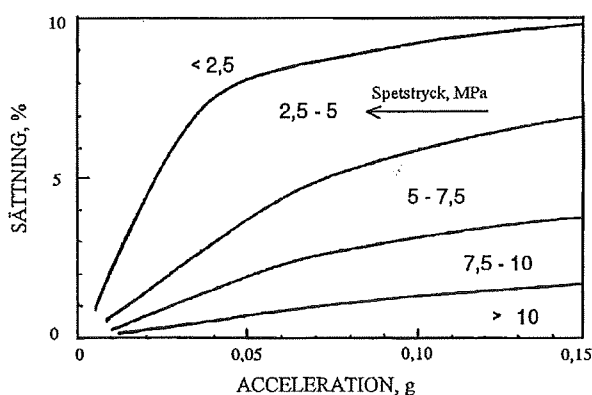
Figur 3.8. Bestämning av den dominerande egenperioden T_0 för ett dubbellager (A och B) med mäktighet H , densitet ρ_A och ρ_B respektive egenperiod T_A och T_B , efter Dobir et al (1976).

där c är vågutbredningshastigheten och H är jordlagrets mäktighet.

3.4 INVERKAN AV VIBRATIONER PÅ JORD OCH GRUNDKONSTRUKTIONER

3.4.1 Sättningar i friktionsjord

Vid påslagning i friktionsjord kan sättningar uppstå, vars storlek är beroende av främst vibrationsamplitudens storlek och jordens densitet. I figur 3.9 redovisas ett samband där den maximala sättningen i ett jordlager kan uppskattas med ledning av trycksonderingsresultat. Sättningen anges i procent av det påverkade jordlagrets mäktighet och gäller för ett stort antal

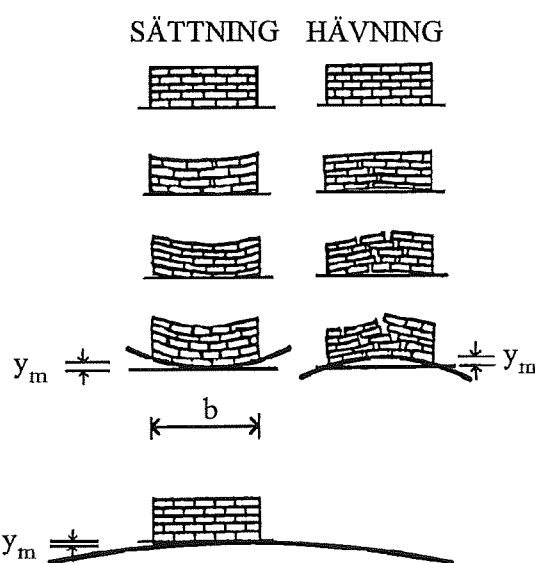


Figur 3.9. Sättningar i friktionsjord, i % av lagertjocklek vid upprepade vibrationscykler som funktion av jordens fasthet (spetsstryck från trycksondering), Massarsch (1993).

lastcyklar. Vid påslagning i ett löst sandlager med ett trycksonderingsmotstånd av exempelvis 2,5 - 5 MPa kan i närheten av pålen sättningar av storleksordning 5 % av jordlagermäktigheten uppstå.

3.4.2 Böjningseffekter

En ibland bortglömd effekt vid vågutbredning är böjningen av markytan när vågfronten passerar. Markytans böjning kan medföra skador på installationer i jord och i grundkonstruktioner. Vid passage av en vågfront försätts markytan i upprepade sättnings- och hävningsrörelser, jämför figur 3.10.



Figur 3.10. Principskiss av markytans böjning vid passage av en vågfront under en byggnad, Massarsch (1992).

3.4.3 Skador på grundkonstruktioner och installationer i jord

Hävnings- och sänkningsrörelsen av markytan vid vågutbredningen (R-vågor) är beroende av vågutbredningshastigheten c och svängningshastigheten v . Massarsch och Broms (1991) och Massarsch (1993) har granskat vibrationsskadekriterier för byggnader, som tillämpas i olika länder. Det har visat sig att skadeverkan är i hög grad beroende av undergrundens (jordlagrens) dynamiska egenskaper (våghastigheten). Även den dominerande svängningsfrekvensen (och därmed våglängden) påverkar skadeverkan. Med ledning av dessa skadekriterier har den kritiska böjningen beräknats för olika länders normer, där skador förväntas uppstå. När en kritisk böjning av ca $1,5 \cdot 10^{-5}$ överskrids kan skador observeras på sättningskän-

liga grundkonstruktioner. Sambandet gäller för fallet då byggnadens längd är lika med, eller kortare än halva våglängden, jfr. figur 3.10.

Med ledning av denna undersökning har Massarsch och Broms (1991) föreslagit ett enkelt semi-empiriskt samband, som anger värdet av en kritisk svängningshastighet då skador kan uppstå i känsliga grundkonstruktioner eller installationer i jord,

$$v_{kr} = 4,7 \cdot 10^{-5} \cdot c \quad (3.7)$$

där v_{kr} är den vertikala svängningshastigheten och c vågens utbredningshastighet.

Massarsch (1993) har studerat effekten av den kritiska böjningen, som gäller för olika relationer mellan byggnadslängd och våglängd. Som exempel visas sambandet för ett typiskt bostadshus med en längd av 15 m, jämför figur 3.11. Vågutbredningshastigheten har antagits variera mellan 50 och 500 m/s, som är ett typiskt intervall för ytvågshastigheter i lösa till medelfasta jordar.

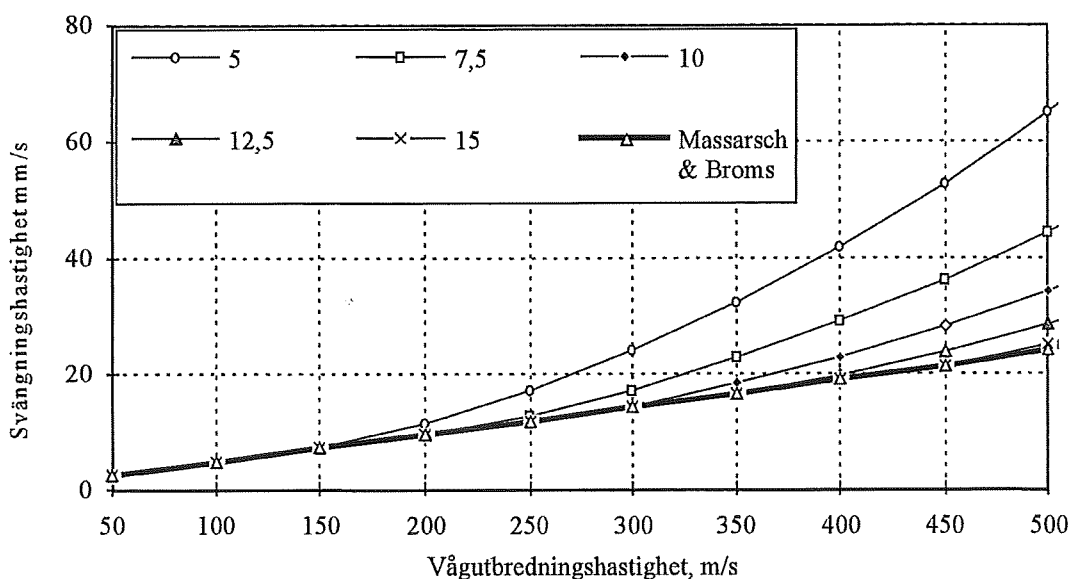
Det förslagna skadekriteriet enligt ekvation (3.7) samt figur 3.11 gäller för en transient störning (stötbelastning). Vid upprepad eller stationär vibrationsbelastning kan skadeverkan vara större. Därför måste den kritiska svängningshastigheten reduceras med avseende på vibrationskällans karaktär, byggnadens kvalitet och skadornas omfattning. I tabell 3.3 föreslås empiriska faktorer (A_1 , A_2 och A_3) som bygger på

liknande samband som används i europeiska normer, Massarsch och Broms (1991). Dessa faktorer kan kombineras med ekvation (3.7) enligt tabell 3.3.

$$v_{kr} = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot [4,7 \cdot 10^{-5} \cdot c] \quad (3.8)$$

Tabell 3.3. Empiriska faktorer som tar hänsyn till faktorerna A_1 , A_2 och A_3 .

Vibrationskällan	A_1
Stötbelastning	1,0
Upprepad belastning	0,6
Stationär belastning	0,3
Byggnadstyp	A_2
Mycket vibrationskänsliga konstruktioner, historiska monument eller liknande, byggnader utan erforderlig grundläggning	0,5
Vibrationskänsliga konstruktioner (tegelväggar), byggnader med bristfällig grundläggning	1,0
Byggnader med bra grundläggning, icke vibrationskänsliga grundkonstruktioner	1,5
Grundkonstruktioner av stål eller armerad betong med bra grundläggning	2,5
Acceptabel Skadeverkan	A_3
Försumbar	0,7
Lätt	1,0
Medel	2,0
Svår	4,0



Figur 3.11. Kritisk vertikal svängningshastighet vid fortplantning av vågor med olika hastigheter och dominerande frekvenser (byggnadslängden antas vara 15 m).

3.5 PRAKTISKT EXEMPEL

I praktiken kan det vara angeläget att i förväg grovt kunna uppskatta storleksordningen på vibrationer vid påslagning. I litteraturen har redovisats samband mellan markvibrationens partikelhastighet v , slagningsenergin W , och avståndet, D , jämför figur 3.12.

Diagrammet är i logaritmisk skala men trots detta är spridningen av mätvärden stor. För översiktliga bedömningar kan följande samband användas, Martin (1980)

$$v = k \cdot W^{0,5} / D \quad (3.9)$$

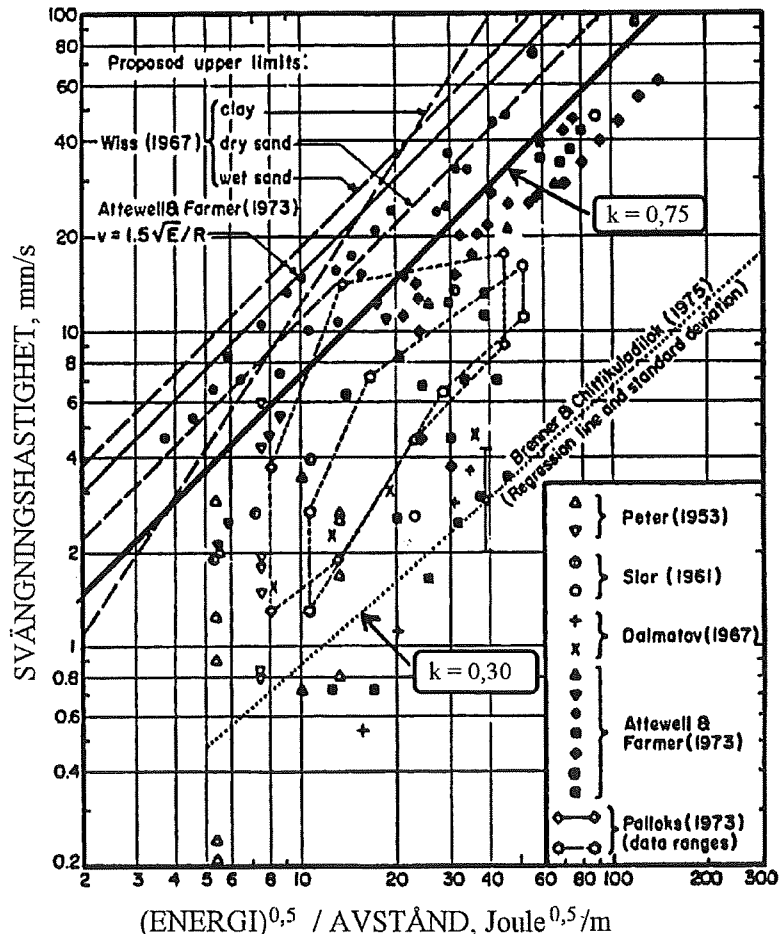
där $K = 0.75$ är en empirisk faktor enligt figur 3.12. Det övre gränsvärdet gäller i första hand för slagning av spont och slanka stålpålar med låg impedans. Vid slagning av betongpålar i medelfasta och lösa jordar varierar koefficientens (k) medelvärde ofta mellan 0,5 och 0,75.

Figur 3.13 redovisar ett exempel på resultat från vibrationsmätningar vid slagning av en betongpåle i friktionsjord. I de två vänstra diagrammen visas resul-

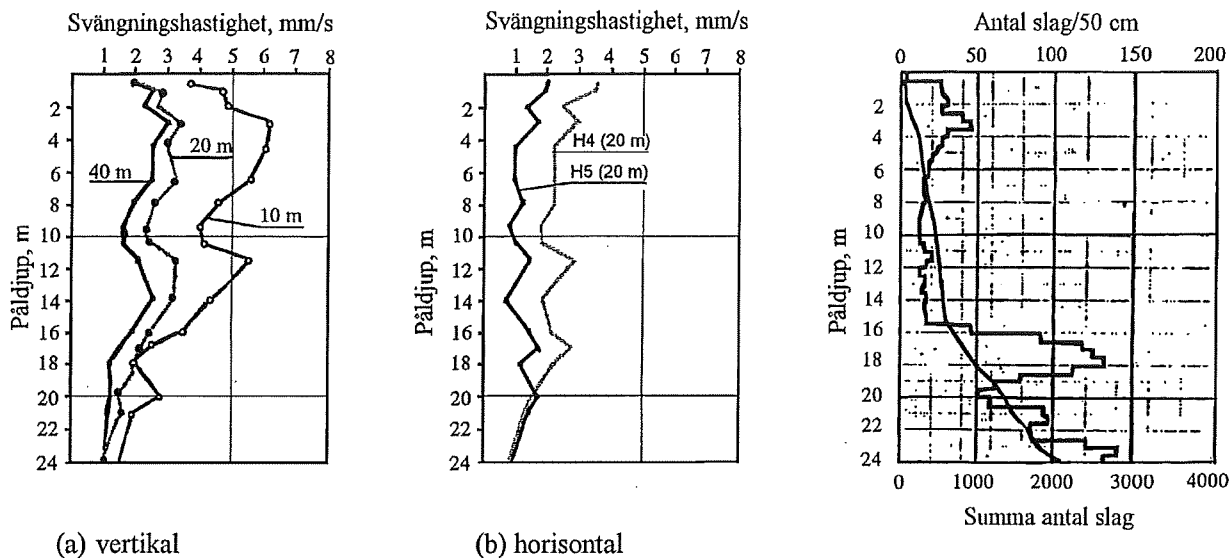
tat från vibrationsmätningar på olika avstånd från pålen (uppmätt på markytan). Den på markytan uppmätta partikelhastigheten har avsatts som funktion av pålspetsens djup under markytan. I det högra diagrammet visas en hejarsonering med irriterat påslagningsmotstånd.

Vibrationernas storlek är störst när pålen penetrerar genom det medelfasta ytlagret. I början av påslagningen är avståndet kortast mellan vibrationskällan och mätpunkten. Nära markytan dominerar dessutom ytvågorna som har mindre geometrisk dämpning. Med ökande påldjup avtar vibrationsintensiteten, trots att jordlagrens fasthet tilltar. Detta beror delvis på att avståndet från givaren till vibrationskällan (pålspetsen) ökar med pålens nedträngningsdjup. Dessutom framkallar pålspetsen vid nedträngning i det fasta bottenskiktet huvudsakligen volymvågor (P- och S-vågor) som minskar snabbare än ytvågor (R-vågor).

Mätningarna tyder på att vid påslagning i friktionsjord huvuddelen av vibrationsenergin alstras i närheten av pålspetsen. Det är således viktigt att man vid bedömning av vibrationsamplitudens storlek vid



Figur 3.12. Partikelhastighetens amplitud (vertikal och horisontal) som funktion av avståndet och tillförd energi, efter Brenner and Viranuvu, (1977).



Figur 3.13. Partikelhastigheten i markytan som funktion av påldjup och slagningsmotstånd.

pålslagning tar hänsyn till de geotekniska förutsättningarna på platsen. Dessa kan ligga till grund för bedömning av slagningsmotståndet som funktion av djupet, och därmed vibrationskällans läge (och avstånd från markytan) under pålslagningen. Med ledning av avståndet från vibrationskällan till mätpunkten och jordens dämpningsfaktor kan ett vibrationsdämpningssamband bestämmas som visar vibrationsamplitudens storlek som funktion av djupet, och därmed risken för eventuella vibrationsproblem.

Det rekommenderas dock att provpålsning utförs i början av projektet för att verifiera vibrationsprognosen, eftersom det kan vara svårt att teoretiskt förutse jordens geodynamiska egenskaper samt de ibland komplexa förhållandena på en arbetsplats.

Kapitel 4.

Omgivningspåverkan i friktionsjord

4.1 INLEDNING

Spont och påslagning i friktionsjord påverkar omgivande jord och närliggande konstruktioner. Påverkan ger i huvudsak upphov till sättningar i jorden och vinkeländringar i konstruktioner. Även hävningar och förändringar av hållfastheten i jorden kan uppstå. Omgivningspåverkan kan ge upphov till skador i de närliggande byggnaderna. Storleken på påverkan beror på ett antal inverkanse faktorer.

Omgivningspåverkan till följd av pål och spontslagning i friktionsjord har behandlats nationellt och internationellt i ett flertal rapporter, se bl.a Meyerhof (1959), Robinsky och Morrisson (1964), Davidson m.fl. (1981), Hellman m.fl. (1985), Long (1989), Åhnberg (1991), Rehnman (1993) och Hintze (1994). En principiell uppdelning av omgivningspåverkan i friktionsjord kan göras enligt följande:

- sättningar
- hävningar
- förändring av hållfastheten i jorden

Med sättningar menas i detta fall deformationer i jorden till följd av packningseffekter. Vibrationer bildas vid påslagningen som fortpantas i jorden och packar jorden vid byggnaden. Packningen av jorden kan ge ojämna deformationer i byggnader och dess grundkonstruktion.

Med hävningar menas att jorden har en så hög naturlig lagringstäthet att pålarna trycker undan jorden och orsakar hävningar i närliggande konstruktioner. Om jorden har hög lagringstäthet uppkommer en dilatans (svällning) i jorden som innebär att lagringstätheten blir lägre efter slagningen och hållfastheten i jorden minskar.

Om vattenmättade kontraktanta jordar utsätts för en upprepad påverkan av vibrationer från slagning sker en portrycksuppbyggnad i jorden. Denna portrycksuppbyggnad resulterar i en minskning av effektivtrycket σ' i jorden som reducerar hållfastheten i jordmaterialet. Om effektivtrycket minskar ned till

noll kan liquefaction (jordförvätskning) uppstå. Risken för liquefaction ökar då grundvattennivån är ytligt belägen.

4.2 INVERKANSE FAKTORER

Pål och spontslagning i friktionsjord är mycket komplext problem. Tillförlitliga beräkningsmetoder för att beräkna omgivningspåverkan saknas idag. Detta beror på att både fysikaliska och entreprenadberoende faktorer inverkar. Storlek och utbredning av påverkan är därför mycket svår att beräkna i praktiken. I litteraturen betraktas t. ex sättningar i friktionsjord till följd av vibrationspåverkan som näst intill omöjliga att analytiskt beräkna och föreslås baseras på tidigare erfarenhet från det aktuella området, se bl.a Terzaghi och Peck (1967). Det är således av stor vikt att utnyttja empiriska resultat från det aktuella området.

Hintze (1994) har föreslagit att inverkanse faktorer i samband med pålning i löst lagrad friktionsmaterial bör delas upp i:

- fysikaliska faktorer knutna till pålning/spontningsarbetet
- entreprenadberoende faktorer knutna till pålning/spontningsarbetet
- fysikaliska faktorer knutna till påverkade skadeobjekt

Som tidigare behandlats i kapitel 1 är konsekvensen av omgivningspåverkan svår att exakt definiera. En skada på en byggnad är mer knutet till ett krav på brukbarhet från användaren än en brottdefinition, se bl.a Olsson och Stille (1984).

Eftersom omgivningspåverkan i allmänhet är av störst intresse då omgivande byggnader och konstruktioner är belägna nära slagningen är erfarenheterna i regel baserade på tätortsförhållanden. Dessvärre är det mycket svårt att beskriva en generell metod för tätortsförhållanden. Detta beror i huvudsak på följande faktorer:

- grundförhållandena i tätort har stora variationer i jordens sammansättning till följd av vertikalt och horisontalt heterogena fyllningar
- det är svårt att placera grundundersökningen i "bra" undersökningspunkter till följd av bebyggelse på platsen.
- hållfastheten i de omgivande byggnaderna är ofta nedsatt eftersom de tidigare blivit påverkade av verksamheter i närheten eller av sättningar

Uppkomst, transport och effekt av pålningsvibrationer är av en komplex natur med många variabler och relaterade osäkerheter. Storleken på vibrationer i ett visst projekt kan mätas ganska bra i fält men förutsägelse av effekten på byggnaden är osäker. Varje pålningsobjekt är därför en unik kombination av process och grundförutsättningar. Varje närliggande konstruktion har sina egna speciella egenskaper som måste beaktas. Detta har behandlats av bl.a Head och Jardine (1992). *Figur 4.1* visar principiellt inverkan av variabler vid pålning.

Holmberg m.fl (1984) menar att vibrationer dämpas relativt snabbt i friktionsjord men sprids relativt långt ut från arbetsplatsen i kohesionsjord och att transporten av vibrationer till omgivningen från slagningen beror på följande faktorer :

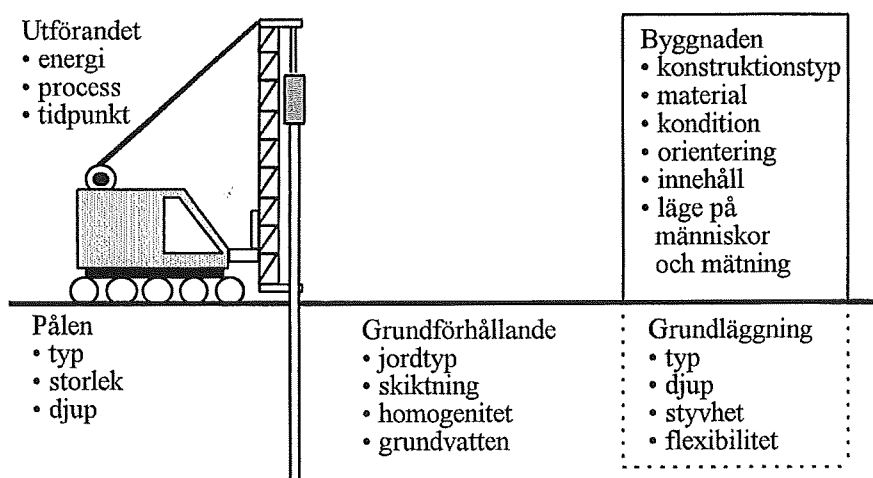
- vikten på slagutrustningen
- varaktigheten av slagningen
- frekvensen på slagningen
- fallhöjden

- avstånd mellan pålning och påverkat objekt
- pålens utformning
- omgivande och underlagrad jord
- tvärsnittsarean på påle/spont
- ytstrukturen på påle/spont
- excentriska eller ojämna slag

Dessa 10 fysikaliska faktorer överensstämmer ganska väl med en studie av Hintze (1994) som visade att 12 svenska pålningsexperter uppfattade följande 7 fysikaliska faktorer kopplade till riskobjektet som mest betydelsefulla vid pålning i löst lagrad friktionsjord:

- materialegenskaper
- slagningsmetod
- jordegenskaper
- antal slag och antal pålar
- stoppslagningskriterium
- variation i jordegenskaper
- upprepad påverkan

Åhnberg (1991) menar att vibrationsnivåer på olika avstånd från pålslagning i sand eller grus kan som mest vara av storleksordningen: ca 50 mm/s på 3 m avstånd, 10 till 15 mm/s på 10 m avstånd och 3 mm/s på 30 m avstånd. Pålslagning i siltigt material kan ge något lägre vibrationsnivåer. Dessa nivåer kan jämföras med de gränsvärden som angivits i kapitel 2 i denna rapport.



Figur 4.1. Omgivningsinverkande faktorer vid pålning. Head och Jardine (1992)

Lacy och Gould (1985) anger att sammanpackning av friktionsjord inträffar vid väsentligt lägre vibrationsnivåer än de vibrationsnivåer som kan skada angränsande byggnader. Redan vid 2,5 till 5 mm/s (mätt på markytan) ger påslagningen en sammanpackning av löst till medelfast lagrad friktionsjord. Även Mattsson m.fl (1988) redovisar att sättningar inträffat i omgivningen trots att uppmätta vibrationer i samband med påslagningen varit mycket små.

I kommande delkapitel 4.2.1 till 4.2.7 redovisas de 7 mest betydelsefulla fysikaliska faktorerna vid slagning i löst lagrad friktionsjord.

4.2.1 Materialegenskaper

Materialegenskaper i pålen/sponten inverkar på omgivningspåverkan menar bl.a Massarsch (1992). Detta till följd av att pålar/sponter i kombination med omgivande jord har olika impedans. Även Head och Jardine (1992) menar att materialegenskaper inverkar på omgivningspåverkan. De flesta rapporter som studerats anger att betongpålar ger en större påverkan än stål- och träpålar. Det skall dock påpekas att materialegenskapernas betydelse skiljer sig mellan olika rapporter. Resultat från laborieförsök visar generellt en mindre betydelse, se t.ex Robinsky och Morrison (1964) samt Ahlberg och Persson (1987), medan resultat från produktionsförhållanden visar på en större, se t.ex Andersson och Olsson (1991) samt Eriksson m. fl. (1992).

Resultat från produktionspålning beskrivna av bl.a Hellman m.fl. (1985) och Eriksson m.fl. (1992) visar en mindre omgivningspåverkan då pålmaterialet ändrats från betong till stål. En mindre tvärsnittsarea på pålen innebär också en minskad påverkan enligt Hellman m.fl (1985). Även mantelytans råhet inverkar och en grövre mantelyta tenderar att ge en större påverkan än en slätare.

Krokigheter i pålar vid slagningen ökar omgivningspåverkan till följd av ocentriska slag. Slagen ökar vibrationernas storlek vilket har rapporterats av t.ex Holmberg m.fl (1984) och Hellman (1983). För att minimera uppkomsten av horisontella tryckvågor och minska vibrationerna skall pålarna därför initieellt vara så raka som möjligt och förborring bör alltid ske i blockig fyllning.

4.2.2 Slagningsmetod

Inverkan av slagningsmetoden har diskuterats av bl.a Terzaghi och Peck (1967), Peck m.fl (1974), Hellman (1983), Holmberg m.fl (1984) och Massarsch (1992). Löst lagrad friktionsjord packas effektivast av vibra-

tioner och det enklaste sättet att skapa vibrationer är att slå pålar menar Terzaghi och Peck (1967). Produktionsresultat visar att låga fallhöjder på hammaren minskar vibrationer i friktionsmaterial, se t.ex Holmberg m.fl. (1984). Resultat från produktionspålning visar att det är bättre att använda en lätt hejare än en tung hejare för att minska sättningar i omgivningen, se t.ex Hellman (1983).

4.2.3 Jordegenskaper

Resultat från laborieförsök och produktionspålning visar att jordegenskaper har en mycket stor betydelse för storlek och utbredning av omgivningspåverkan. Den horisontala påverkande zonen runt pålen, som beror på valvverkan i friktionsjorden, förhindrar utbildande av fullt horisontellt jordtryck runt pålen. Denna effekt beror till stor del på jordens egenskaper, se Robinsky och Morrison (1964) och Ahlberg och Persson (1987).

En ganska fullständig sammanställning av laborieförsök- och fullskaleförsök rörande omgivningspåverkan i friktionsjord har gjorts av Åhnberg (1991). Resultat som visar utbredning av bärigheten vid påslagning är också av intresse för bedömning av storlek på omgivningspåverkan. Detta har utförligt behandlats av Ekström (1989). Studierna visar att den påverkande zonen är ganska lika runt manteln och under pålspetsen. Resultaten motsvarar ganska väl omgivningspåverkansresultat presenterade av Platena och Nolet (1957), Robinsky och Morrison (1964), Davidson m. fl. (1981) och Ahlberg och Persson (1987).

Den aktuella lagringssituationen i ett område är alltid av väsentlig betydelse när man ska bedöma omgivningspåverkan. En låg lagringstäthet i ett område ökar påverkanskänsligheten. Termerna porositet, portal, relativ lagringstäthet, torrdensitet och packningsgrad används för att definiera det aktuella lagringsförhållandet i jorden och är ett mått på påverkanskänsligheten i ett område. Relativ lagringstäthet motsvaras av det engelska uttrycket "relative density".

Den relativa lagringstätheten (I_d) definieras som:

$$I_d = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (4.1)$$

där

- $e_{\min}$ = portal i jorden vid fastaste lagring
- $e_{\max}$ = portal i jorden vid lösaste lagring
- e = portal i den aktuella jorden

Detta begrepp används ofta i svensk litteratur för att beskriva en friktionsjords fasthet. Handboken Bygg, band G (1984) delar upp friktionsjord i tre grupper som visas i *tabell 4.1*.

Tabell 4.1. Uppdelning av friktionsjord baserad på relativ lagringstätheten enligt Handboken Bygg, band G (1984).

Beteckning	Relativ lagringstäthet I_d
lös	< 0.3
medel	0.3-0.8
fast	> 0.8

Indelning av friktionsmaterial med avseende på relativ lagringstäthet kan också baseras på Lambe och Whitman (1979). Indelningen sker i fem grupper som visas i *tabell 4.2*.

Tabell 4.2. Indelning av lagringstäthet enligt Lambe och Whitman (1979)

Relativ lagringstäthet I_d [%]	Indelning
0-15	mycket lös lagring
15-35	lös lagring
35-65	medelfast lagring
65-85	fast lagring
85-100	mycket fast lagring

Enligt Broms (1976) blir sättning i friktionsjord erfarenhetsmässigt liten när relativa lagringstätheten (I_d) är över 70 %.

Svenska erfarenheter av portal och porositet i olika friktionsjordar i naturligt tillstånd redovisats i SGF Laboratieanvisning del 7 och i *tabell 4.3*.

Tabell 4.3. Portal och porositet hos jord. Efter SGF Laboratieanvisningar del 7.

Jordart	Portal, e	Porositet, n %
Silt	0.3 - 1.4	25 - 60
Sand, ensgraderad	0.5 - 0.9	35 - 45
Sand, månggraderad	0.15 - 0.4	15 - 30
Morän	0.1 - 0.3	10 - 25

Det finns olika sätt att beskriva hur komprimerat ett friktionsmateriel är. Åhnberg (1991) tar upp följande:

$$\text{lagringstäthet } I_d = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} = \frac{1}{\rho_d} \frac{\rho_d - \rho_{d \min}}{rd - \rho_{d \min}}$$

$$\text{packningsgrad; } R_d = \frac{\rho_d}{\rho_{d \max}}$$

$$\text{packningsbarhet } D_f = \frac{e_{\max} - e_{\min}}{e_{\min}}$$

$$\text{densitetsindex; } D = \frac{n_{\max} - n}{n_{\max} - n_{\min}}$$

Dessa fyra uttryck anger den möjliga komprimeringen av friktionsjorden och därmed en viss uppfattning om jordens påverkanskänslighet. I_d kan dock vara svårt att bestämma då sättet att bestämma $e_{\max}$ inte är väldefinierat och en standardiserad metod saknas. Packningsgrad är ett mer väldefinierat uttryck på packningsbenägenheten eftersom det kan bestämmas ur proctorkurvan. Även uttrycket packningsgrad har brister eftersom det inte säger något om den maximala packningen i fält.

Åhnberg (1991) menar att det maximala värdet för e , ρ_d , osv inte ska ses som ett konstant karakteristiskt värde för respektive material. Den "maximala" densiteten varierar med mättnadsgraden, vattenkvoten och med använd utrustning. Ju mer energi som används vid packningen desto högre densitet uppnås förutsatt att materialet tillåts dränera under packningens gång. Vid hög spänning och högt energitillskott blir dessutom effekten av kornkrossning alltmer markant vilket kan resultera i mycket kompakta material. Uppnådd komprimering beror av bl.a frekvens, acceleration och varaktighet hos vibrationskällan, spänningsnivån.

Åhnberg (1991) menar att silthalten i det aktuella friktionsmaterialet har en väsentlig betydelse. För att jorden ska låta sig packas i någon större grad måste finjordhalten måste vara lägre än 20 à 30 %. Höga finjordhalter kan endast ge packning inom ett mycket begränsat område. Vidare ger packning av stenigt grovgrus uppblandat med grusig grovsand respektive siltig finsand små skillnader vid dynamisk packning jämfört med statisk packning.

Packningsbarheten D_f visar hur pass lätt ett material packas och rekommenderas av bl.a Hough (1957). *Tabell 4.4* visar D_f för olika jordar.

Enligt Kramer och Richwien (1988) uppstår i allmänhet inte sättningar på grund av dynamisk belastning vid pålning och spontning då packningsbarheten D_f är större än 0,8.

Resultat visar också att packning på grund av vibrationer inte sker förrän accelerationen överskrider ett visst tröskelvärde, eller kritisk acceleration. Detta innebär i princip att ett material som tidigare

Tabell 4.4. Exempel på $e_{\max}$, $e_{\min}$ och packningsbarheten D_f för olika jordar. Efter Hough (1957)

	portal			porositet (%)		packn.barhet
	e_{max} (lös)	e_{cr}	e_{min} (fast)	n_{max} (lös)	n_{min} (fast)	D_f
Friktionsmaterial						
<u>Ensgraderat material</u>						
helt runda(teoretiskt)	0,92	-	0,35	47,6	26,0	1,6
standard Ottawa sand	0,80	0,75	0,50	44	33	0,6
ensgraderad sand	1,0	0,80	0,40	50	29	1,5
ensgraderad silt	1,1	-	0,40	52	29	1,8
<u>Månggraderat material</u>						
siltig sand	0,90	-	0,30	47	23	2,0
rena sandiga jordar	0,95	0,70	0,20	49	17	3,8
micaceous sand	1,2	-	0,40	55	29	2,0
siltig sand och grus	0,85	-	0,14	46	12	5,1
Blandade jordar						
sandig eller siltig lera	1,8	-	0,25	64	20	5,2
månggraderad jord (morän)	0,70	-	0,13	41	11	4,4

packats till ett visst portal (e) inte får någon ytterligare packning förrän det utsätts för vibrationer där accelerationen är större än den som motsvarar vad den tidigare varit utsatt för.

4.2.4 Antal slag och antal pålar

Totala antalet slag och totala antalet slagna pålar inverkar på omgivningspåverkan. Sättningsarnas storlek har visat sig öka med ett konstant värde som är proportionellt mot antalet slagna pålar. Se t.ex Holmberg m.fl. (1984) och Åhnberg (1991).

4.2.5 Stoppslagningskriterier

Ett hårt stoppslagningskriterium innebär att det krävs ett ökat antal slag vid stoppslagningen. Sättningsobservationer visar att omgivningspåverkan ökar då ett hårt stoppslagkriterium används. Se t.ex Hellman (1983), Mattsson m. fl. (1987) och Eriksson m. fl. (1993).

4.2.6 Variation i jordegenskaper

Variation i jordegenskaper och speciellt variation i relativ lagringstäthet är en faktor som påverkar omgivningspåverkan. Stora variationer i relativ lagringstäthet i jorden resulterar i större omgivningspåverkan och i lokala skador i objektet. Se t.ex Thorburn och Hutchinson (1985), Bengtsson m. fl. (1989) samt Thorburn m. fl. (1989).

4.2.7 Upprepad påverkan

Fältobservationer vid påslagning i friktionsjord visar att storleken på sättningar minskar när jorden på nytt

utsätts för en påverkan. Se t.ex Thorburn och Hutchinson (1985), Andersson och Olsson (1991) samt Hintze (1994). Om pålarna däremot slås djupare andra gången blir sättningen "jungfrulig" under de tidigare slagna pålarna.

4.3 SÄTTNINGAR

Sättningar uppstår i löst lagrad friktionsjord som sammanpackas i samband med pål- och spontslagning. De forskningsresultat som berör detta kommer i huvudsak från laboratorieförsök samt fullskaleförsök i forskningsprojekt. Resultat från produktionspållning finns sparsamt redovisat och i huvudsak från de senaste 15 åren.

4.3.1 Storlek och utbredning av sättningar

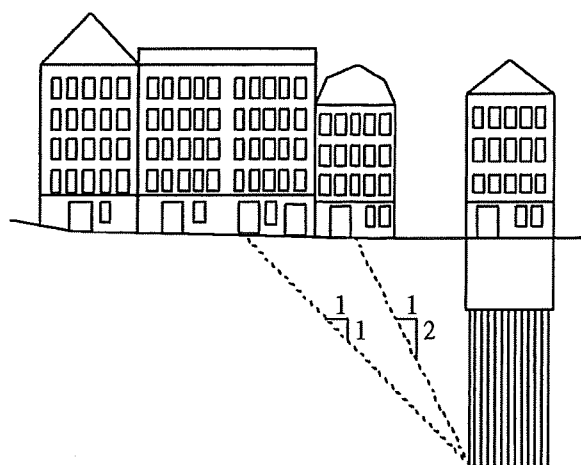
Sättningar som uppkommer i löst till medelfast lagrad friktionsjord beror på sammanpackning av friktionsjorden. Ensgraderad jord (graderingstalet $C_u < 5$) är generellt mer sättningsbenägen än månggraderad jord ($C_u > 15$). Sättningar kan också inträffa där finkornig jord som överlagrar grovkornig jord "strilar" ner i den grovkorniga friktionsjorden eller omvänt då grovkornig jord trycks ned i finkornig jord.

De är värt att notera att de resultat som rapporterats från produktionspållning i allmänhet avviker från resultat från laboratorie- och fullskaleförsök.

Påverkad zon för skadliga sättningar i friktionsjord från produktionsresultat anges av till exempel Hellman m.fl (1985) till en halv pållängd. Liknande resultat har också rapporterats av Mattsson m.fl (1988) och Eriksson m.fl (1992). Det finns dock rapporter

som visar stora variationer både uppåt och nedåt från denna "tumregel". Avvikelsen beror sannolikt på entreprenadberoende faktorer som hör ihop med utförandefasen och som påverkat projekten. Dessa har varit okända eller oklara vid utvärderingen av den påverkade zonen.

Den zon där skada uppkommer antages således ofta grovt vara begränsad med linjen 2:1 från pålspetsen, medan den påverkade zonen begränsas med linjen 1:1. Zonerna redovisas i *figur 4.2*.



Figur 4.2. Påverkade zoner i samband med produktionspållning i löst lagrad friktionsjord. Efter Hellman m .fl (1985).

Vid laboratorieförsök under kontrollerade förhållanden i homogent friktionsmaterial påverkades en väsentligt mindre zon än den som påvisas vid produktionsförhållanden.

Robinsky och Morrisson (1964) fann i en laboratoriestudie att packningszonen kunde beskrivas som en utdragen lök. Nedanför pålspetsen var zonen formad som en sfär runt pålspetsen. Därifrån steg zonen som en nästan vertikal cylinder. Närmast ytan skedde

en minskning av diametern. Vidden av denna packningszon ökar med ökande påldiameter, ökad ytråhet hos pålen och ökad sanddensitet. Resultat från en liknande studie presenterades av Ahlberg och Persson (1987). Deras undersökning visade att:

- då sanden är löst lagrad är det bättre att välja en lätt hejare för att minska störningszonen, medan det vid medelfast och fast lagring är bättre att välja en tyngre hejare.
- fallhöjden inte påverkar packningen i någon större grad.
- ett ökat antal slag på en påle ökar packningsgraden.
- då pålgrupper slås var det betydligt svårare att få ned de sista pålarna, detta trots att packningszonerna inte gick i varandra.

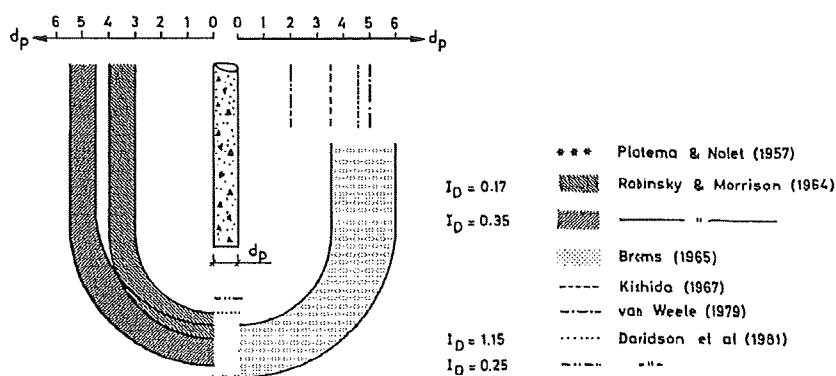
Resultaten från dessa försök kan jämföras med teoretiska studier av Meyerhof (1959). Dessa studier visar att vid löst lagrad jord kan den påverkade zonen beräknas till 6 gånger pålens diameter utmed skaftet och den påverkade zonen under pålen till ca 5 gånger pålens diameter.

Resultat presenterade av Broms (1965) som baserades på en sammanställning av olika forskningsresultat visar att den påverkade zonen är ca 5-6 påldiametrar ut ifrån pålskaftet och ca 3-5 påldiametrar under pålen.

Ekström (1989) har redovisat och sammanställt resultat från påverkan på bärigheten i jorden efter pålslagning. Redovisningen visar likartade resultat som vid sättningar och bör kunna användas för omgivningspåverkansprognoser. Sammanställningen visas i *figur 4.3*.

Det är svårt att ange slutsatser när det gäller hur man skall jämföra resultat från laboratorieförhållanden och produktionsförhållanden. Möjligen kan man se laboratorieresultatet som den minsta påverkan

Figur 4.3. Sammanställning av påverkan på bärighet i omgivande jord efter slagning av pålar i friktionsjord. Ekström (1989).



som kan erhållas efter slagning och de stora uppmätta sättningarna från produktionspålning som den största påverkan som erhålls när samtliga entreprenadberoende faktorer inverkar negativt.

Åhnberg (1991) menar att ett flertal undersökningar visar att sättningssonen ökar med:

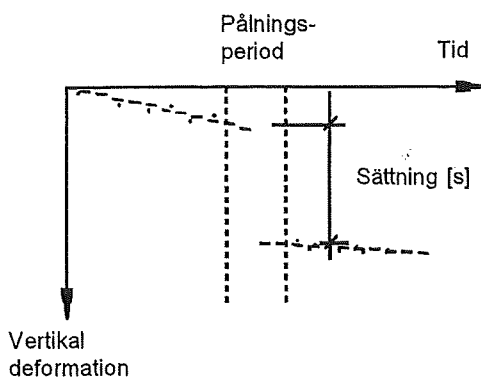
- minskande finjordhalt
- ökande grovlek på fin- och mellansand
- ökad vattenmättnad i jorden

Vidare gäller att månggraderade grövre jordar vanligen får en högre lagringstäthet efter packning än ensgraderad sand. En ursprungligen låg lagringstäthet hos materialet fordrar i allmänhet ett mindre packningsarbete för att uppnå en viss högre lagringstäthet än ett material med en relativt hög lagringstäthet från början.

Den vertikala deformationen som uppkommer till följd av pålning eller spontning i löst lagrad friktionsjord utbildas vanligen under en kort period, se t.ex. Terzaghi och Peck (1967), Thorburn och Hutchinson (1985), Mattsson m. fl. (1988), Andersson och Olsson (1989), Janson & Nissling (1992) och Eriksson m. fl. (1992). Den vertikala deformationen i de påverkade byggnaderna betecknas sättningen (s), se figur 4.4.

I samband med sättningsanalyser i grundförstärkningsprojekt föreslår Andersson och Olsson (1991) att analysen delas upp i tre delar:

- bakgrundsdeformation (deformation innan arbetet)
- genomförandedeformation (deformation under slagningsperioden)
- efterdeformation (deformation efter arbetet)



Figur 4.4. Observation av sättning i en vibrationspåverkad byggnad grundlagd på friktionsmaterial.

Efterdeformationer har sin förklaring i:

- att lastöverföringen på pålarna inte sker direkt.
- en elastisk ihoptäckning av pålmaterialet krävs.
- att omgivande jord kräver en viss deformation innan samverkan jord-påle är fullt utbildad.

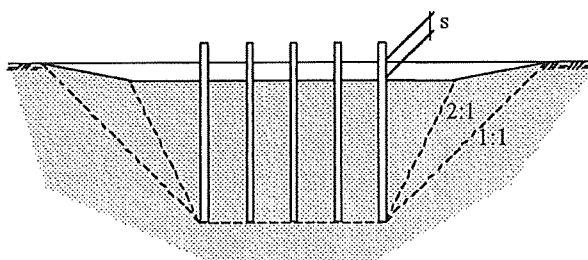
Det är därför lämpligt att vänta ett antal år för att se den tidsberoende deformationen innan slutlig utvärdering sker.

Andersson och Olsson (1991) anger att sättningspåverkan vid slagning av slanka rörpålar med höghastighetshejare i löst lagrad friktionsjord ofta sträcker sig 10 à 20 m från pålningen. Variationerna i uppkomna sättningar är emellertid mycket stora och förhållandena måste studeras i varje enskilt fall. Janson och Nissling (1992), som sammanställt ca 3000 sättningsobservationer i västra och östra Gamla Stan i Stockholm, visar att sättningspåverkan sträcker sig maximalt 25 m ut från pålningen. Även i detta fall gällde undersökningen slanka rörpålar slagna med höghastighetshejare. Längderna på pålarna varierade från 10 m till 35 m och maximala påverkan uppkom både vid korta och långa pålar.

Mattsson m.fl (1989) studerade grundförstärkningar i Gamla Stan i Stockholm. Deras analys visar att flera arbetsmoment, såsom borming, slagning, schaktning, etc. inverkar på sättningens utbredning och storlek. Slagningen av pålar står dock för 70-80 % av sättningen.

Vid omlagring av friktionsmaterialet kan pålar också utsättas för påhångsbelastningar som medför en fortgående rörelse nedåt (krypning). Detta gäller både spetsbärande och mantelbärande pålar.

Rehnman (1993) har sammanställt en mängd artiklar som behandlar slagning av flera pålar. Rehnman menar att vid slagning av en grupp av pålar så inträffar den huvudsakliga sättningen inom gruppen och i närheten av pålgruppen, se figur 4.5.



Figur 4.5. Sättningar vid pålslagning i friktionsjord. Rehnman (1993)

Sättnings storlek s är mycket svår att förutse menar Rehnman och variationerna är stora men som grov tumregel kan sättnings storlek s uppskattas enligt nedan

$$\begin{aligned}s &= 0,01 \cdot L_f && \text{vid slagning av betongpålar} \\s &= 0,005 \cdot L_f && \text{vid slagning av smala stålspjälkar}\end{aligned}$$

där L_f är pållängden i lös till medelfast lagrad friktionsjord.

4.4 HÄVNINGAR

Den jordvolym som antages trängas undan till följd av pålning och spontning i lera motsvarar förenklat volymen av den nedträngda volymen av pålarna/sponten. Detta behandlas i kapitel 5 i denna rapport. Detta gäller för material som inte volymändras vid påverkan. I verkligheten sker i friktionsmaterial en volymändring så att en viss volymökning sker i hård packad friktionsjord och en viss volymminskning sker i löst lagrad friktionsjord. Storleken på volymökningen kan naturligtvis i praktiken vara svår att uppskatta men som tumregel kan den antas variera mellan 1,0 och 1,5 gånger pål/spont-volymen vid medelfast till mycket fast lagrad jord.

Den undanträngda volymen (hävningen) kan ge upphov till horisontalrörelser och markhävningar i omgivningen. Faktorer som påverkar storlek och utbredning av hävningen i en byggnad beror förenklat på följande:

- typ av jord
- pål/spont-volym
- grundvattennivå
- relativ lagringstäthet
- typ av byggnad
- vikt av byggnad
- typ av grundläggning
- markytans lutning

Om det inte finns bättre information föreslås att den modell som föreslagits i kapitel 5.3 baserad på Dugan och Freed (1984) och Rehnman (1993) används för att bedöma storleken på hävningen vid ett medelfast lagrat friktionsmaterial. Modellen baseras på antagandet att markhävningarna i anslutning till pålningsarbetet uppkommer inom ett område vilket begränsas av linjer i 45° lutning från pålspetsen och uppåt.

4.5 FÖRÄNDRING AV HÅLLFASTHET I JORDEN

I samband med slagning av pålar och spont i friktionsmaterial påverkas omgivande jord och en betydande förändring av lagringstätheten och hållfastheten kan uppkomma. Mycket stora porvattenöverttryck kan till exempel uppstå vid pålslagning i packningsbenägen vattenmättad friktionsjord. Fenomenet förstärks när jorden initieellt har låg lagringstäthet och vid en hög halt av rundhet (sfäriskhet) hos kornen. Detta innebär att jordens hållfasthetsegenskaper påverkas som kan medföra stabilitetsproblem intill slänter och schakter. Utomlands är denna påverkan speciellt vanlig vid jordbävningar.

Åhnberg (1991) menar att jordförstärkning genom djuppackning utförs med metoder som ger effekter snarlika dem vid pålning. Därför kan en hel del erfarenheter från t. ex vibrowingspackning användas. Mätningar vid markytan på olika avstånd från pålning och från vibroflotation har konstaterat att det sker en likartad transport av vibrationer, se Greenwood och Farmer (1971).

Friktionsjord packas huvudsakligen genom att framkalla "liquefaction" (jordförvätskning) med dynamisk och cyklisk belastning. Följande faktorer ökar risken för liquefaction enligt Åhnberg (1991):

- stor mängd finjord
- hög vattenmättnadsgrad
- ytligt belägen grundvattennivå
- låg lagringstäthet
- låg spänningsnivå i jorden
- lång påverkanstid från vibrationer

Skälet till att vibrowingspackning fungerar effektivt är att små tryckvågor skapas och portryck byggs upp så att efterföljande skjuvvågor orsakar jordbrott, se Mitchell (1981). Detta i sin tur medför att partiklarna packar ihop sig i en tätare lagring.

Vibrowingspackning är generellt ineffektiv då finjordshalten, definierad som jord med kornstorlek mindre än 0,074 mm, är högre än 20 à 25 %, se Mitchell (1981). Enligt Åhnberg (1991) ger låg permeabilitet i jorden inte den snabba dränering som behövs för effektiv packning. Hög finjordshalt kan också innebära att kohesionskrafterna blir för stora. Trots detta har det rapporterats att lerig silt packats genom vibrowingspackning.

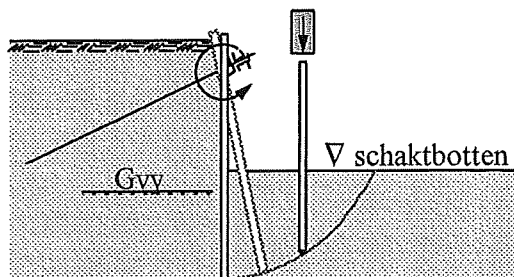
Förutom finjordhalt anger Åhnberg (1991) att också kornstorleksfördelningen inverkar på packningsresultatet. Lagringstätheten hos grovsand eller

grus blir normalt högre än för ensgraderad sand efter vibrowingpackning.

Åhnberg menar att erfarenheter visar att det är svårare att packa från 60 % till 80 % relativ lagringstäthet än från 30 % till 80 %. En sand med $I_d \geq 0,70$ ger normalt försumbara sättningar från vibrationer eller stötar enligt D'Appolonia m fl (1953).

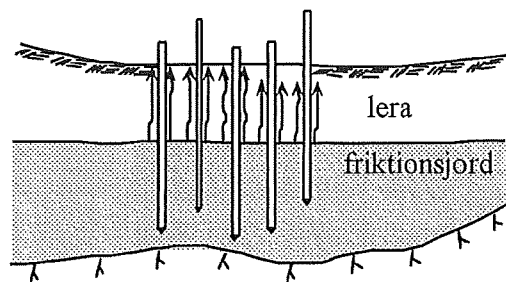
Sättningsmätningar vid fullskaleförsök med vibrowing i uppspolad mellansand som överlagrande ens- och mellangraderad fin- och mellansand har beskrivits av Avermalm m fl (1983). Deras resultat visar att det uppstår en sättningstratt med en radie som är ungefär lika stor som neddrivningsdjupet. Liknande resultat har också presenterats av Bjerin m.fl. (1988) för sättningar i och intill vibrowingpackad sand/silt i Sundsvall.

Stora porvattentrycksökningar kan inträffa vid påslagning i packningsbenägen vattenmättad friktionsjord och framför allt i jord som innehåller silt och finsand. En kraftig ökning av porvattentrycket kan leda till att jorden förlorar sin skjuvhållfasthet, vilket kan leda till stabilitetsproblem för angränsande konstruktioner och slänter. Ett speciellt problem som belysts av Sahlström och Stille (1979) är den minskning av det mothållande passiva jordtrycket som uppstår då pål- eller spontslagning sker intill spontkonstruktioner. Detta visas i figur 4.6.



Figur 4.6. Påslagning i friktionsjord intill spontkonstruktion. Sahlström och Stille (1979).

Inom områden med så kallat artesiskt grundvatten (grundvatten med tryckhöjd över markytan) kan ofrivillig dränering av grundvattensmagasinet uppkomma genom att grundvatten strömmar upp längs pålar slagna genom ett tätande lerlager, se figur 4.7. Genom att effektivspänningen minskar, minskar även hållfastheten i jorden och stabilitetsbrott kan uppkomma. Det är således viktigt att i förväg undersöka grundvattensituationen i ett nytt område och bedöma risken för grundvattendränering.

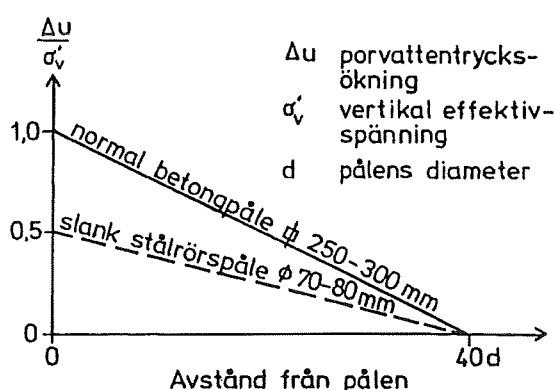


Figur 4.7. Ofrivillig dränering av grundvattensmagasin i samband med påslagning.

Den porvattentrycksökning som påslagningen orsakar utjämnas dock relativt snabbt i de flesta friktionsjordar. Crooks m. fl. (1980) redovisar att redan efter ett dygn har porvattentrycksökningen minskat till hälften i sand.

Porvattentrycksökningens storlek påverkas, förutom av jordens egenskaper, också av påslagningsarbetets omfattning. Engvall och Holm (1984) redovisar ett fall där en ändring från slagning av betongpålar till slagning av stålspålar minskade porvattentrycksökningen till hälften. I handboken "Pålgrundläggning" (Olsson & Holm, 1993) föreslås en grov tumregel för sambandet mellan porvattentrycksökningen och påverkans utbredning vid siltig och finsandig jord, se figur 4.8.

Svårigheterna att förutse vilka porvattentrycksökningar som kommer att inträffa gör att man alltid bör installera porvattentryckmätare när påslagningen kan leda till stabilitetsproblem.



Figur 4.8. Porvattentrycksökning i siltig och finsandig jord vid påslagning. (Handboken "Pålgrundläggning", Olsson & Holm, 1993).

4.6 PÅVERKANSREDUCERANDE ÅTGÄRDER

Det finns ett antal påverkansreducerande åtgärder som minskar omgivningspåverkan vid slagning av pålar och spont i friktionsjord. Dessa åtgärder kan i princip sättas in vid ställen, se figur 1.3 och 4.1.

- vid källan
- längs fortplantningsvägen
- vid skadeobjektet

Det är viktigt att analysera i vilket skede av byggprocessen som en påverkansreducerande åtgärd ska sättas in. I princip gäller att om påverkan i ett visst byggskede överstiger vad som kan accepteras så skall reducerande åtgärder sättas in. En kontinuerlig övervakning av påverkan under genomförandeperioden bör ske så att underlag för beslut om åtgärder kommer fram.

Det är också viktigt att analysera vilka åtgärder som är mest lönsamma ur ekonomisk synvinkel och vad det kostar om ingen reducerande åtgärd sätts in. Detta kan lösas med riskanalys kombinerad med beslutsteori, se bl.a Ang och Tang (1984) samt Berggren m fl (1991).

Observationsmetoden eller "aktiv design" är ett bra sätt att kontrollera och styra omgivningspåverkan i byggskedet, se Terzaghi och Peck (1948), Helene-lund (1977) och Bredenberg, Olsson och Stille (1981). Systemet består i princip av en arbetsordning med en förutsägelse, ett observationprogram och ett antal förberedda åtgärder som sätts in när resultatet från observationen finns.

Förbörning är ett viktigt arbetsmoment som kan och bör användas som påverkansreducerande åtgärd. Förbörningen minskar omgivningspåverkan och utförs före pålning/spontning för att slagningen ska bli lättare genom fyllning och blockig jord och minska sättningarna. Detta har diskuterats av bl. a Peck m. fl. (1974), Tomlinson (1986) och Mattson m.fl. (1988).

Enligt Broms (1976) och Holmberg m.fl (1985) är det lämpligt att slå de första pålarna närmast skadeobjektet först vid lös lagring och därmed uppnå en "barriäreffekt" som minskar påverkan (skadan) på omgivningen.

Vid spontningsarbeten i friktionsjord över grundvattenytan menar Holmberg m. fl. (1985) att det finns betydande möjligheter att sänka vibrationsnivån i omgivningen. Exempel på sådana mindre störande spontkonstruktioner är berlinerspont med neddrivna stålballar.

Omgivningsreducerande åtgärder kan enligt Rosenberg (1989) principiellt delas upp i:

- Förebyggande åtgärder som sätts in för att förhindra att skada uppstår
- Begränsande åtgärder som sätts in för att förhindra att skadan blir för stor

Åtgärder kan vara:

- att minska pållängden
- att slå så få slag som möjligt
- att arbeta med låg fallhöjd under drivning
- att minska nedslagen pål/spont -volym
- anpassa slagningen till de aktuella jordegenskaper
- att använda ett mildare stoppslagningskriterium
- att förborra vid blockighet i jorden
- att ändra pålmaterial från betong till stål
- att minska tvärsnittsarea på pålen/sponten
- att förstärka omgivande konstruktioner innan slagningen påbörjas
- att börja med att slå pålar närmast skadeobjektet så att så kallad barriärverkan uppstår

Erfarenhetsmässigt minskar omgivningspåverkan med:

- ett observationssystem under byggskedet som successivt bygger upp en ökad kunskap av omgivningspåverkan
- ett kvalitetssäkringsprogram som minimerar felen
- utbildning av personal som snabbare och effektivare kan upptäcka skador och sätta in motåtgärder
- incitamentsklausuler som premierar en låg omgivningspåverkan i byggskedet

Påverkansreducerande åtgärder bör sättas in så tidigt som möjligt. Kostnaden för att ändra metod eller upphandlingsform är då lägst.

Alla tillbud skall rapporteras. Detta ger vägledning för framtida förebyggande åtgärder. Vidare skall avhjälpande åtgärder alltid vara förberedda. Kunskap och avvikelserapporter måste föras vidare för att utarbeta bättre förebyggande och begränsande åtgärder.

Kapitel 5.

Omgivningspåverkan i lera och silt

5.1 INLEDNING

Spont- och påslagning i lera och silt kan medföra generering av stora porvattenövertryck vilka kan medföra stabilitetsproblem för slänter och schakter. På- eller spontslagningen kan även medföra stora markrörelser vilka kan förskjuta och/eller skada närbelägna konstruktioner såsom pålar och VA-ledningar. I det följande beskrivs några metoder vilka kan användas som verktyg vid prognostisering av dessa effekter samt hur effekterna kan reduceras och följas upp.

I dilatanta jordar, till exempel fast lagrad silt, kan porvattenundertryck uppstå vilket kan ge påverkan på senare slagna pålar i form av till exempel falska pålstopp. Detta berörs dock inte ytterligare i detta avsnitt.

5.2 GENERERING AV PORVATTENÖVERTRYCK

Kunskap om det genererade porvattenöverskottets storlek på grund av spont- och påslagning är främst av intresse vid stabilitetsanalyser i släntnära områden samt vid studier av rekonsolideringen och därmed återhämtningen i hållfasthet i jorden närmast pålen. Pålens bärförmåga är direkt förknippad med återhämtningen i hållfasthet och därmed även efter hur lång tid pålen kan bära den dimensionerande lasten.

Erfarenheter från portrycksmätningar vid påslagning i lera, Roy et al. (1981), och silt, Kirkebø (1989), visar att det genererade porvattenöverskottet på en viss nivå är som störst när pålens spets passerar en viss nivå då det är vid detta tillfälle jorden är som hårdast ansträngd. Dessa iakttagelser stämmer överens med erfarenheter från CPT-sonering. Studier har därför bedrivits för att jämföra portrycksuppbyggnaden runt sfärisk- såväl som cylindrisk expansion av kaviteter. Nära pålens mantelyta ger de båda modellerna jämförbara resultat, Massarsch och Broms (1981), emedan teorin med expansion av cylindrisk kavitet bättre stämmer med resultat från mätningar när avståndet från pålens mantelyta ökar.

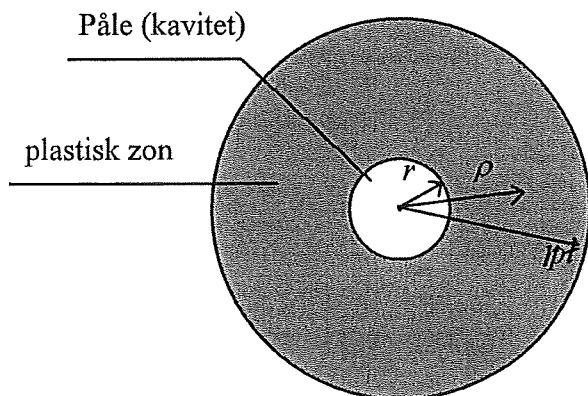
När en massförträngande påle penetrerar jorden uppstår en zon närmast pålen inom vilken jorden störs kraftigt, plasticeras (*figur 5.1*). Utbredningen av denna zon kan beräknas enligt Vesic (1972) på basis av cylindrisk expansion av en oändligt lång kavitet och under antagande om plant töjningstillstånd. Följande uttryck kan då användas:

$$\frac{r_{pl}}{r} = \sqrt{\frac{G}{\tau_{fu}}} = \sqrt{\frac{E}{2\tau_{fu}(1+\nu)}} \quad (5.1)$$

där

- r_{pl} = den plastiska zonen utbredning radiellt från kavitetens centrum
- r = kavitetens radie
- G = jordens skjuvmodul
- E = jordens elasticitetsmodul
- ν = kontraktionstalet
- τ_{fu} = lerans odränerade skjuvhållfasthet

Den plastiska zonen utbredning blir enligt ekvation (5.1) ca 3,5-6,5 påldiametrar för styvhetskvoter



Figur 5.1. Definition av den plastiska zonen runt en expanderande kavitet (efter Torstensson, 1973).

E/τ_{fu} i intervallet 150-500, där det lägre värdet kan anses gälla för lösa normalkonsoliderade leror och allt större värden representerar en ökande grad av överkonsolidering. I denna plastiska zon kan man med någorlunda god approximation uppskatta det genom påslagningen genererade porvattenövertrycket Δu med hjälp av beräkningsmodeller presenterade av till exempel Lo och Stermac (1965), Torstensson (1973) och Massarsch (1976) (kapitel 5.2.1). Utanför den plastiska zonen i den så kallade elastiska zonen avtar dock det genererade porvattenövertrycket snabbt med det radiella avståndet från pålen. Det sistnämnda porvattenövertrycket är betydligt svårare att uppskatta då portrycket i denna zon är direkt förknippat med storleken av de genererade skjuvdeformationerna. Nishida (1963) har dock angivit ett förenklat uttryck för beräkning av detta porvattenövertryck.

De nedan beskrivna metoderna för prognostisering av porvattenövertryck har visat sig fungera väl under någorlunda homogena förhållanden. Metoderna bör dock ses som approximativa och bör i känsliga fall alltid följas upp med portrycksmätningar. I skiktade jordar där jordlagren omväxlande uppträder dilatant och kontraktant vid skjuvning blir en teoretisk prognostisering i det närmaste omöjlig. I dessa fall kan krävas en mycket noggrann produktionskontroll som eventuellt är baserad på mätresultat från en provpålning.

Några faktorer som kan ha stor inverkan på det genererade portrycket är påslagningsutrustning, samspillet mellan hejare och påle samt stoppslagning. En hejare som angriper pålen excentriskt i slagögonblicket kommer att ge upphov till horisontalsvängningar hos pålen vilket ytterligare förstärker portrycksuppbyggnaden i jorden.

Enligt ovan utbildas på ett visst djup normalt det största porvattenövertrycket när pålens spets passerar. Kirkebø (1989) konstaterade vid slagning av grova stålrospålar i silt med dieselhejare emellertid att porvattenövertrycken blev större utmed pålens mantelyta än vid dess spets. Detta förklarade hon med att hejaren inte gav pålen en rak centrisk stöt. Vid stoppslagning och/eller vid påslagning genom fastare skikt kan även samma fenomen uppstå med en ökande horisontalsvängning hos pålen vilket kan ge en extra generering av porvattenövertryck. Dock fann Kirkebø även att portrycksuppbyggnaden avtog när pålarna stoppslogs ner i fastare jordlager. Hon angav som trolig förklaring att den fastare jorden gav en viss inspanning vilket reducerade horisontalsvängningarna och därmed även portrycksuppbyggnaden.

5.2.1 Analytiska metoder för

prognostisering av porvattenövertryck

Uttrycket av Lo och Stermac (1965) kan efter arbete av Lo (1968) skrivas på den förenklade formen i ekvation. (5.2). Med denna ekvation kan man uppskatta det maximalt genererade porvattenövertrycket Δu_{max} i den plastiska zonen på grund av skjuvning och en isotrop totalspänningsförändring i lera.

$$\Delta u_{max} = [(1 - K_0) + (0,5 + 0,267 \cdot \log S_t)] \sigma'_o \quad (5.2)$$

där

- K_0 = vilojordtryckskoefficienten in situ
- S_t = lerans sensitivitet
- σ'_o = den effektiva vertikalspänningen in situ före påslagningen

Från uttrycket i ekvation. (5.2) kan man se att det maximala porvattenövertrycket ökar med lerans sensitivitet genom en strukturell nedbrytning och kollaps av lerans kornskelett vid skjuvning. Detta är logiskt då en lös lera blir allt mer kontraktant med ökande sensitivitet.

För en mellansensitiv lera med en sensitivitet i intervallet $8 < S_t < 30$ och med $K_0 \approx 2/3$ blir det genererade porvattenövertrycket Δu_{max} enligt ekvation. (5.2) 1,07 till 1,23 gånger den effektiva vertikalspänningen σ'_o .

Massarsch (1976) angav följande uttryck för porvattenövertrycket i den plastiska zonen för en vattenmättad lera:

$$\frac{\Delta u}{\tau_{fu}} = 0,578 (3A - 1) + 2 \ln \frac{r_{pl}}{\rho} = 2 \ln \frac{r}{\rho} + \ln \frac{G}{\tau_{fu}} + 1,734A - 0,578 \quad (5.3)$$

där

- Δu = porvattenövertryck på grund av pålningen
- τ_{fu} = lerans odränerade skjuvhållfasthet
- A = Skemptions portryckskoefficient
- r_{pl} = den plastiska zonens utbredning radiellt från kavitetens centrum
- r = radiellt avstånd till pålens centrumaxel, $r \leq \rho \leq r_{pl}$ (se Figur 5.1)
- G = skjuvmodulen (kan sättas till ca 50 % av G_o , se nedan)

Från uttrycket förstås att det genererade porvattenövertrycket ökar med ökande pålradie, skjuvmodul och Skemptions portrycksparameter A . Däremot minskar det genererade porvattenövertrycket med avståndet från pålens centrumaxel ρ . Vid användning av uttrycket i ekvation. (5.3) ligger främst osäkerheten i bestämning av Skemptions portryckskoefficient A samt jordens skjuvmodul G för de aktuella skjuvtöjningarna.

Enligt Hansbo (1990) varierar Skemptions portrycksparameter A med lerans konsolideringsförhållanden enligt värdena i tabell 5.1.

Tabell 5.1. Skemptions portrycksparameter A för olika jordar (Hansbo 1990).

Typ av lera	A
Högsensitiv lera	0.75 - 1.5
Normalkonsoliderad lera	0.5 - 1.0
Svagt överkonsoliderad lera	0 - 0.5
Starkt överkonsoliderad lera	-0.5 - 0
Packad sandig lera	0.25 - 0.75

Portrycksparametern A kan för vattenmättade jordar bestämmas genom fält- och laboratorieförsök. I laboratoriet bestäms värdet på A med hjälp av konsoliderade odränerade triaxialförsök (se Hansbo, 1990).

Värdet på A är starkt beroende av den aktuella deviatoriska spänningsförändringen i relation till erforderlig spänningsförändring för brott samt jordens konsolideringsförhållanden. Generellt kan man säga att en jord som inte utvecklar ett porvattenövertryck vid skjuvning har portryckskoefficienten $A=0$. Detta kan gälla för spänningsnivåer under förkonsolideringsstrycket före brott. En normalkonsoliderad vattenmättad jord som utvecklar ett genererat porvattenövertryck lika med den deviatoriska spänningsökningen har dock en portryckskoefficient närmare $A=1$. Kontrakterar den sistnämnda jorden vid skjuvning kan värdet på A bli större än ett, vilket kan vara fallet för sensitiva jordar.

I den del av den plastiska zonen runt en påle där jorden kan anses helt omrörd, 1-2 påldiametrar ut från pålen, kan Skemptions portryckskoefficient approximativt sättas till $A=1$. I högsensitiva leror kan dock detta värde vara större.

Lerans maximala skjuvmodul G_o kan bestämmas enligt Larson och Mulabdic' (1991). För hög- till mellanplastiska leror ($I_p > 10\%$, $w_L > 30\%$) kan G_o bestämmas ur

$$G_o \approx \left(\frac{208}{I_p} + 250 \right) \tau_{fu} \quad (5.4)$$

och för lågplastiska leror ($I_p < 10\%$, $w_L < 30\%$) och leriga gyttjor kan G_o bestämmas ur

$$G_o \approx 504 \left(\frac{\tau_{fu}}{w_L} \right) \quad (5.5)$$

där

- I_p = $w_L - w_p$ = lerans plasticitetstal (plasticitetsindex), som decimaltal
- w_L = lerans konflytgräns, som decimaltal
- w_p = lerans plasticitetsgräns, som decimaltal
- τ_{fu} = lerans odränerade skjuvhållfasthet korregerad avseende w_L enligt Larsson m. fl. (1985).

Saknas information om plasticitetsgränsen w_p kan man approximativt bestämma plasticitetstalet I_p från den för svenska mineraljordar anpassade A-linjen enligt Casagrande. Plasticitetstalet fås då som:

$$I_p = 0,75 (w_L (\%) - 26) \quad (5.6)$$

Den maximala skjuvmodulen G_o kan även uppskattas på andra sätt. Approximativt fås till exempel enligt Andréasson (1979):

$$\frac{G_o}{\tau_{fu}} \approx 500 \text{ för normalkonsoliderad lera} \quad (5.7)$$

och

$$\frac{G_o}{\tau_{fu}} \approx 800 - 1700 \text{ för överkonsoliderad lera} \quad (5.8)$$

Massarsch och Drnevich (1979) angav följande uttryck för G_o för lösa leror:

$$G_o = \frac{6281}{0.3 + 5.1w^2} (\sigma'_o)^{0.5} \quad (5.9)$$

där

- w = lerans vattenkvot (som decimaltal)
- σ'_o = effektivspänningen in situ

Baserat på "resonant column" försök angav Massarsch (1985) en metod att reducera skjuvmodulen G_o för en skjuvtöjning av 0.25 % som funktion av plasticitetstalet I_p .

$$G = R_F G_o \quad (5.10)$$

där

$$R_F = 0.0724 I_p^{0.475} \quad (5.11)$$

och

$$I_p = w_L - w_P = \text{lerans plasticitetstal (plasticitetsindex) i procent}$$

För bestämning av porvattenövertrycket enligt ekvation (5.3) använde Massarsch och Broms (1981) 50 % av G_o . Diagrammet i figur 5.2 kan användas för bestämning av det genererade porvattenövertrycket enligt ekvation (5.3).

Enligt uttrycket i ekvation. (5.3) och enligt figur 5.2 uppskattas det genererade porvattenövertrycket, en pålradie utanför mantelytan ($\rho = 2r$), till $5,3 \cdot \tau_{fu} - 6,7 \cdot \tau_{fu}$ för styvhetskvoter i intervallet $250 < G/\tau_{fu} < 1000$ under antagande att $A=1$.

$$\frac{\Delta u}{\tau_{fu}} = 0.578(3A - 1) \left(\frac{r_{pl}}{\rho} \right)^2 \quad (5.12)$$

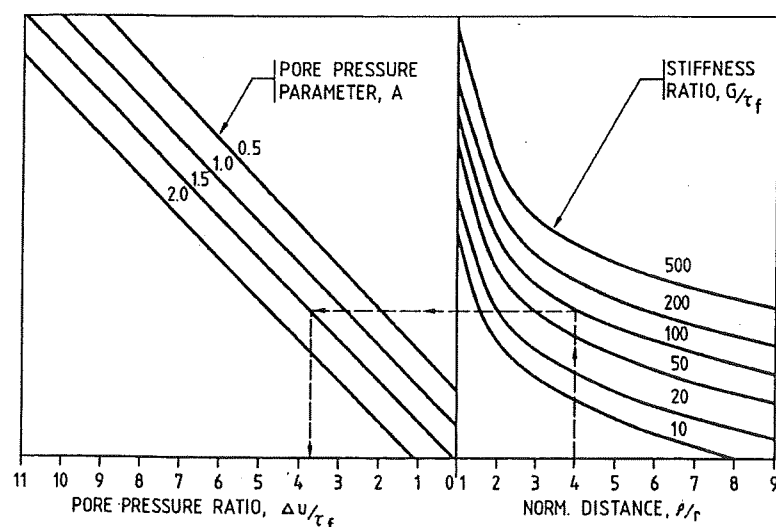
A = Skemptions portryckscoefficient för den aktuella töjningsnivån
 r = radiellt avstånd till pålens centrumaxel, $\rho > r_{pl}$

Den elastiska zonen kan anses begränsas av de lutande begränsningslinjerna i figur 5.2.

5.2.2 Prognostisering av porvattenövertrycket med hjälp av CPT-sondering

Det maximalt förväntade porvattenövertrycket närmast pålen i den plastiska zonen kan även prognostiseras med hjälp av CPT-sondering. Robertson et al. (1990) visade på utmärkt överensstämmelse mellan det vid CPT-sonderingen genererade porvattenövertrycket och det genererade porvattenövertrycket vid slagning av grova stålrörspålar i silt.

Robertson (1990) visade även hur rekonsolideringsförloppet av det genererade porvattenövertrycket runt en slagen påle kan bestämmas på basis av porvattenövertryckets avklingning runt en CPT-sond vid uppehåll i sonderingen (se även Torstensson, 1977). Genom att anta att den horisontella konsolideringskoefficienten c_h är konstant under rekonsolideringen kan ett uttryck tecknas för beräkning av erforderlig tid för att uppnå en önskad konsolideringsgrad avseende det genererade porvattenövertrycket runt pålen. För att



Figur 5.2. Porvattenövertrycket i den plastiska zonen runt en slagen påle (efter Massarsch och Broms, 1981).

till exempel erhålla en konsolideringsgrad på 90 % av porvattenövertrycket runt pålen kan följande uttryck användas.

$$t_{90(påle)} = \frac{r_{(påle)}^2}{r_{(CPTU)}^2} t_{90(CPTU)} \quad (5.13)$$

där

- $t_{90(påle)}$ = erforderlig tid för att uppnå 90 % konsolideringsgrad runt pålen
- $t_{90(CPTU)}$ = tid som erforderats för att få 90 % konsolideringsgrad runt sonden
- $r_{(påle)}$ = pålens radie
- $r_{(CPTU)}$ = CPT-sondens radie

Uttrycket ovan bör ses som approximativt då antagandet om att c_h är konstant under rekonsolideringen kan ifrågasättas framförallt för grova pålar där den plastiska zonen har stor utbredning. Konsolideringskoefficienten i horisontalled c_h beror av modulen och permeabiliteten. Såväl modulen som permeabiliteten förändras under rekonsolideringsförloppet. Vidare kommer rekonsolideringen att vara allt svårare att prognostisera ju mer skiktad jorden är.

CPT-sondering är även ett utmärkt verktyg för att bedöma om höga porvattenövertryck eventuellt kan sprida sig till omgivningen genom kontinuerliga skikt av mer permeabelt material av till exempel silt eller sand. De i kapitel 5.2.1 redovisade metoderna kan även användas för att prognostisera storleken av porvattenövertrycket i sådana permeabla skikt då dessa är i förbindelse med grundläggningsområdet.

5.2.3 Prognostisering av porvattenövertryck med hjälp av provpålning

När jordens stratigrafi är komplex kan det vara svårt att på enbart basis av analytiska metoder och CPT-sondering göra en tillräckligt bra bedömning av storleken och den geometriska spridningen av eventuella porvattenövertryck. I sådana fall kan det vara nödvändigt att före den egentliga produktionspålningen utföra en provpålning för att få en rättvisande bild av den förväntade portrycksuppbyggnaden. Vid en sådan provpålning bör portrycket mätas i de lager där höga portryck bedömts som kritiska. Porövertryckets spridning radiellt från pålen bör bestämmas genom mätning dels nära pålen, inom den plastiska zonen (7-13 pålradier), och dels på ett avstånd av cirka 10-15 meter från pålen samt i eventuellt ytterligare en punkt cirka 20-30 meter från pålen.

Det är viktigt att portrycksmätningarna utförs i för jordprofilen relevanta skikt varför nivåerna på vilka portrycksmätningar bör utföras bör bestämmas med hjälp av CPT-sondering.

Vid provpålningen bör även testas effekten av att reducera hejarens fallhöjd.

5.3 JORDUNDANTRÄNGNING

Vid slagning av massförträngande (deplacerande) pålar i lera gäller förenklat att volymen av den undanträngda jorden är ekvivalent med volymen av de slagna pålarna reducerad med volymen av den jord vilken eventuellt har avlägsnats med hjälp av proppdragning. Hur den undanträngda jordvolymen påverkar närområdet i form av markhävningar, horisontalförskjutningar och ökade horisontalspänningar beror av en rad olika faktorer vilka huvudsakligen beror av jordtyp, spänningstillstånd samt geometriska förhållanden inom såväl som utanför grundläggningsområdet.

På basis av resultaten från nio fallstudier i en lågsensitiv lera presenterade Dugan och Freed (1984) följande förteckning av olika faktorer vilka påverkar markhävningens storlek:

1. Storleken på hävningen är direkt proportionell mot volymen förskjuten jord. Utanför pålområdet kan hävningen uppskattas till 50 % av den förskjutna jorden.
2. Området inom vilket hävning sker kan uppskattas till ett område som begränsas av linjer i 45° lutning från pålspetsen och uppåt.
3. Proppdragning (förborming) minskar effektiv hävningen. Stabiliserat hålet med bentonit bör dock hålet vara så stort att slurryn kan tränga upp ur hålet när pålen slås. Vid kohesionspålning bör dock hålet ej göras större än påldiametern. Tränger slurryn ut i jorden kan detta medföra en oönskad portrycksuppbyggnad. För att minska effekten av att slurry tränger ut i jorden i stället för att tränga upp till markytan kan pålens installationshastighet minskas. Förborming utan att stabilisera hålet med någon slurry bör inte göras djupare än det kritiska djupet (ekvation. 5.15).
4. Hävning av angränsande mark är omvänt proportionell till rådande spänningssituation in situ.
5. Markhävningen ökar i den riktning mot vilken pålarna slås.
6. Markhävningen blir större i en lågsensitiv lera. Nedbrytning av partikelstrukturen och viss konsolidering reducerar markhävningen i sensitiva leror.

7. Med ökad urschaktning för grundläggningen minskar hävningen utanför pålningsområdet men ökar densamma inom grundläggningsområdet. (Jämför punkt 4 ovan)
8. Hävningen blir större vid slagning i homogena leror än om pålarna slås i en lera med skikt av grövre material.

På basis av bland annat arbetet av Dugan och Freed (1984) presenterade Rehnman (1993) i handboken "Pålgrundläggning" en modell för beräkning av markhävningar och horisontalförskjutningar. Modellen i Figur 5.3 baserar sig på antagandet att markhävningarna i anslutning till pålningsarbetet uppkommer inom ett område vilket begränsas av linjer i 45° lutning från pålspetsen och uppåt.

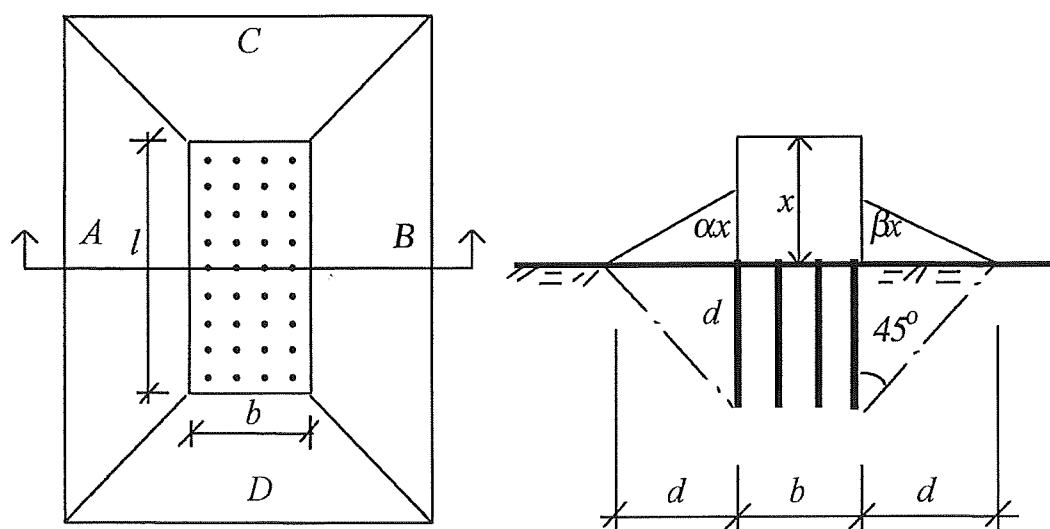
Markhävningen x innanför pålningsområdet $b \cdot l$ i Figur 5.3 kan beräknas med hjälp av sambandet i ekvation. (5.14). Genom att ange de relativa tyngderna för byggnaderna (markbelastningen) inom områdena A, B, C och D kan även markhävningen och dess fördelning uppskattas inom dessa områden.

$$x = \frac{\eta(V_p - \Delta V_{pr})}{d[(\alpha + \beta)\left(\frac{l}{2} + \frac{d}{3}\right) + (\gamma + \delta)\left(\frac{b}{2} + \frac{d}{3}\right) + \frac{bl}{d}] \quad (5.14)$$

där

- x = hävningen inom pålningsområdet
- αx = hävningen av byggnaden A närmast pålningsområdet
- βx = hävningen av byggnaden B närmast pålningsområdet
- γx = hävningen av byggnaden C närmast pålningsområdet
- δx = hävningen av byggnaden D närmast pålningsområdet
- α = byggnad A:s relativa tyngd
- β = byggnad B:s relativa tyngd
- γ = byggnad C:s relativa tyngd
- δ = byggnad D:s relativa tyngd
- η = hävningsfaktor, $0,5 \leq \eta \leq 1,0$ normalt $\eta = 0,75$
- V_p = volymen av nedslagna pålar
- ΔV_{pr} = volymen av proppdragen lera
- d = påldjup under markytan eller schaktbotten
- b = pålningsområdets bredd
- l = pålningsområdets längd

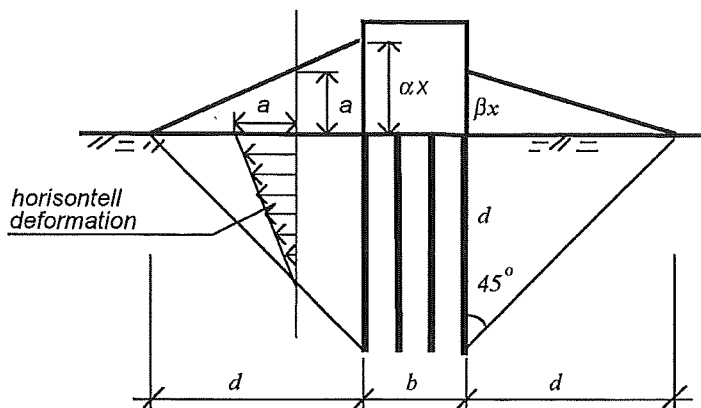
De relativa tyngderna varierar mellan $0 \leq \alpha, \beta, \gamma, \delta \leq 1$ där 0 motsvarar tung byggnad och 1 lätt byggnad. Vid slagning av pålar inom en schakt visade Massarsch (1976) att hävningen inom schakten ökar



Figur 5.3. Markhävning i samband med pålslagning i lera vid horisontell markyta. (efter handboken "Pålgrundläggning", 1993)

I ett flertal studier, bl a Massarsch (1976) och Dugan och Freed (1984) har påvisats att en rekonsolideringsfas påbörjas omedelbart efter det att pålarna är slagna. Denna rekonsolidering kan till och med resultera i en nettosättning. Rekonsolideringen av leran inom den av påslagningen störda jordvolymen

För att reducera markhävningar och horisontalförskjutningar kan lerproppar dras. Dessa bör dock aldrig vara djupare än det kritiska djupet för vilket hålet kollapsar. Enligt Massarsch (1976) fås det kritiska djupet för kontraktionstalet $v = 0,5$ ($K_c=1$) enligt:



$$Z_{kr} = \tau_{fu} \frac{(1 + \ln \frac{3G}{\tau_{fu}})}{\gamma} \quad (5.15)$$

där

- z_{kr} = det kritiska djupet
- τ_{fu} = lerans odränerade hållfasthet
- G = lerans skjuvmodul för det aktuella töjningsområdet vilken kan bestämmas från något av sambanden i ekvation. (5.4-5.9) genom att approximativt sätta $G = G_o/10$ (reduktion på säkra sidan) eller reducera G_o med ekvation. (5.10)
- γ = lerans tunghet (kN/m³)

Det kritiska djupet kan med hjälp av ekvation. (5.15) uppskattas till $0,4 \cdot \tau_{fu} - 0,6 \cdot \tau_{fu}$ för leror med styvhetskvoter i intervallet $250 < G/\tau_{fu} < 1000$ och tungheten $\gamma = 15 - 16$ kN/m³, där 16 kN/m³ avser det lägre värdet.

5.4 HÅLLFASTHETSFÖRÄNDRING

Vid slagning av spont och pålar i lera fås enligt kap. 5.2 närmast sponten eller pålen en helt störd zon med kraftigt förhöjda porvattenstryck. I ett flertal undersökningar, av till exempel Flaate (1972), Massarsch (1976), Bozozuk et al. (1978) och Roy et al. (1981), har påvisats avsevärda reduktioner av den odränerade skjuvhållfastheten i denna zon. Omedelbart efter pålslagningen börjar dock jorden runt pålen att rekonsolidera varför jordens hållfasthet återhämtar sig. Undersökningarna tyder på att jordens hållfasthet har återhämtat sig till fullo när de genererade porvattenövertrycken runt pålen har konsoliderat till 100 %. Flaate (1972) fann till och med att i ett tunt skikt närmast pålen bidrog rekonsolideringen runt pålen till en högre hållfasthet än motsvarande den in situ före pålslagningen. Detta förklarade han med att pålen bidrog till att utjämna portrycket något genom att den hade förmåga att absorbera porvatten. Ytterligare en förklaring kan vara att leran närmast pålen genom omrörning och strukturell nedbrytning rekonsoliderat till en fastare lagring med en högre hållfasthet som följd. Detta tyder på att det är fördelaktigt att slå "torra" pålar som har en viss förmåga att hjälpa till att utjämna porvattenövertrycket i den helt omrörda zonen närmast pålen. En likartad effekt torde erhållas då pålar slås med påspikade vertikaldräner. Pålar av betong och trä bör med andra ord övertäckas med presenningar när de lagerhålls på fabrik och byggar-

betsplats. Fellenius (1955) visade dock att bärförmågan för helt vattendränkta träpålar inte skilde sig från den för pålar som legat ett tag före slagningen. Extremt torra pålar gav dock en påtaglig ökning av bärförmågan (upp emot 150 % av den beräknade 7 dygn efter slagningen).

En nedsättning av hållfastheten kan även fås i den elastiska zonen utanför den plastiska zonen. Denna hållfasthetsnedsättning är dock betydligt mindre. Förändringarna i hållfasthet beror främst på de genererade skjuvtöjningarna och en viss svällning av leran.

För beräkning av reduktionen av hållfastheten i den del av den plastiska zonen som kan betraktas som helt omrörd, ca 1-2 påldiametrar ut från pålen, har Massarsch (1976) föreslagit följande uttryck:

$$\tau_{fu, störd} = \frac{2 \cdot \tau_{fu}}{S_t} \quad (5.16)$$

där

- $\tau_{fu, störd}$ = den störda lerans odränerade skjuvhållfasthet
- τ_{fu} = lerans odränerade skjuvhållfasthet in situ
- S_t = lerans sensitivitet

Man bör ha i åtanke att man även får en nedsättning av hållfastheten vid proppdragning, dels genom störning av leran och dels genom generering av skjuvtöjningar runt hålet efter det att proppen är dragen. Kollapsar hålet kan hållfastheten sjunka drastiskt. Vid stabilitetsproblem eller då stora sidorörelser är kritiska bör proppar aldrig dras vilka är djupare än det kritiska djupet enligt ekvation. (5.15).

I de fall jorden är skiktad och innehåller skikt med högre permeabilitet kan höga porvattenövertryck sprida sig över ett större område. När portrycket stiger i ett sådant skikt minskar effektivtrycket och därmed även hållfastheten i detta skikt. När portrycket närmar sig totalspanningen in situ går skiktets hållfasthet mot noll vilket kan medföra stabilitetsproblem (se vidare kapitel 5.5).

5.5 STABILITETSPROBLEM VID PÅL- OCH SPONTSLAGNING NÄRA SLÄNT

I det följande diskuteras hur höga porvattenövertryck och horisontalförskjutningar i släntnära områden kan ge upphov till stabilitetsproblem. Hur säkerheten mot brott kan analyseras behandlas inte i denna skrift.

Härför hänvisas till till exempel Sällfors (1977), Handboken bygg (1984) och Skredkommissionens anvisningar för släntstabilitetsutredningar (1995).

Från diskussionerna i kap. 5.1-5.4 ovan kan följande slutsatser dras som kan ha en direkt inverkan på stabiliteten vid spont- eller påslagning intill slänter:

- genererade porvattenövertryck kan medföra stabilitetsproblem utmed permeabla skikt av silt eller sand
- markhävningar och horisontalrörelser ökar i den riktning vilken pålarna slås vilket kan medföra att en slänt blir allt mer ansträngd, till följd av ökande skjuvtöjningar, om till exempel en felaktig slagordning längs med slänten har valts. Vid slagning av pålar ovanför släntkrönet medför rörelserna att jordtrycket i släntens aktivzon ökar.
- vid påslagning i sensitiv lera kan skjuvhållfastheten närmast pålen sänkas drastiskt med brott som följd

I de fall en slänt kan förväntas gå till brott vid en förhöjning av porvattentrycket utmed permeabla skikt bör dränerade och kombinerade analyser genomföras för glidytor längs med dessa skikt och för glidytor vilka tangerar eller korsar sådana skikt. Syftet med dessa analyser är att studera det maximalt tillåtna porvattentrycket för att fortfarande ha en tillfredsställande säkerhet mot brott. Detta maximala porvattentryck kan sedan sättas som gränsvärde vid produktionskontrollen som kan genomföras genom mätning av porvattentrycken i respektive skikt under påslagningen.

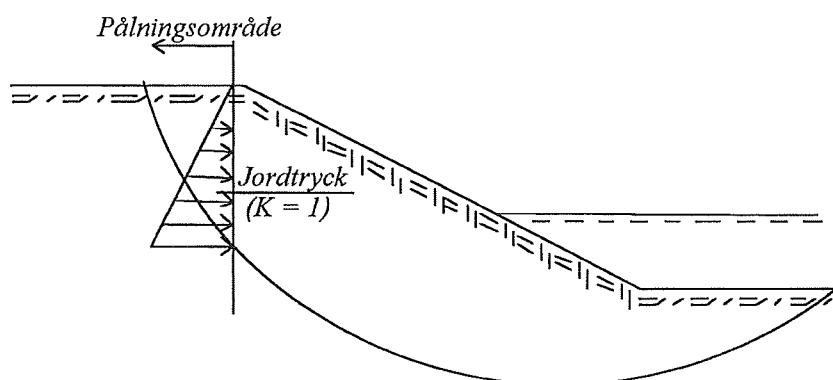
För att planera påslagningsarbetet med hänsyn till risken för stabilitetsproblem på grund av höga port-

ryck kan de förväntade porvattenövertrycken genom påslagningen prognostiseras med hjälp av ekvationerna (5.2) och (5.3) samt genom spetstrycksomröring av typ CPT. Dessa prognostiserade porvattenövertryck kan sedan jämföras med de från stabilitetsberäkningarna erhållna maximalt tillåtna porvattenövertrycken. Påvisas ett stabilitetsproblem vid denna jämförelse bör porttrycksreducerande åtgärder vidtas (se vidare kap. 5.6).

En ökning av porvattentrycket i en homogen lera påverkar inte den odränerade hållfastheten och därmed inte stabiliteten baserad på totalspänningsanalys. En kombinerad analys bör dock alltid utföras.

Den odränerade skjuvhållfastheten har visat sig vara starkt beroende av jordens spänningsanisotropi, varför man vid denna typ av studier måste ha klart för sig hur hållfastheten är bestämd samt hur denna skall justeras för att hållfastheten skall vara representativ för respektive del av en glidytta. Hur hänsyn till denna typ av spänningsanisotropi kan tas är beskrivet av Larsson (1977) och Skredkommissionens anvisningar för släntstabilitetsutredningar (1995).

I en studie av ett skred som initierats av påslagning invid Drammen älven i Norge visade Aas (1975) att sidorörelserna i grundläggningsområdet ej var så stora att passivt jordtryck mobiliserades i släntområdet ut mot älven. I handboken "Pålgrundläggning" föreslog Rehnman (1993), med resultaten från studien av Aas som underlag, hur hänsyn kan tas till horisontalrörelser på grund av påslagning nära släntkrönet av en slänt vid beräkning av stabiliteten för slänten. I figur 5.5 visas hur ett horisontellt riktat jordtryck med jordtryckskoefficienten $K = 1,0$ kan adderas till de pådrivande krafterna. Detta riktade horisontella jordtryck ersätter även tyngden av de pådrivande jordmassorna vilka i figur 5.5 ligger inom pålningsområdet.



Figur 5.5. Påslagningens inverkan på släntstabiliteten (efter handboken "Pålgrundläggning", Olsson & Holm, 1993).

Rehman påpekar att påslagningen bör starta närmast släntrönet och sedan drivas i riktning bort från slänten. Vidare påpekas att "om den specifika pålarean (Σ påltvårsnittsarea/grundkonstruktionsarea $> 2 \%$) så bör lerproppar dras" för att antagandet om att jordtryckskoefficienten $K=1,0$ ska gälla. Val av lämplig slagordning kan dock påverkas av andra faktorer som till exempel om pålarna är bankpålar eller konstruktionspålar etc. En konstruktionspåle bör inte flyttas ur sitt läge på grund av markrörelser vid slagning av senare slagna pålar.

5.6 PÅVERKANSREDUCERANDE ÅTGÄRDER

I det följande redogörs i punktform för ett antal möjliga påverkansreducerande metoder.

Reduktion av genererat porvattenövertryck:

1. Dra lerproppar för att minska den undanträngda volymen lera till ett minimum. Vid stabilitetsproblem och/eller då markrörelser är kritiska får propparna dock inte dras djupare än det kritiska djupet enligt ekv. (5.15). Krävs proppdragning till större djup måste hålet stabiliseras med till exempel bentonit, varför även hålet måste utföras med större håldiameter så att bentonit slurryn kan tränga upp till markytan när pålen installeras. Pålen bör även sänkas ner långsamt i hålet för att minska risken att bentonitslam pressas ut i jorden. Vid val av proppdragning samt eventuellt i kombination med stabilisering av hålet med bentonit bör hänsyn tas till pålens lastbärande funktion i den färdiga konstruktionen. Proppdragning kan reducera pålens mantelbärförmåga framförallt om hålet har stor diameter.
2. Förborra med auger genom styva jordlager så som fyllning, fasta torrskorpor, tjälad mark och friktionsjordar. Detta kan vara svårt ner under grundvattenytan.
3. Fäst prefabricerade dräner på pålarna före slagning. Då det genererade porvattenövertrycket är som störst närmast pålen är detta en effektiv metod att påskynda rekonsolideringen runt pålen. Skall pålen slås genom fyllning eller annan jordart som kan skada den påspikade dränen kan förborring krävas. Vid långa pålar kan dränen fästas i första skarven vilket medför att första pålelementet fungerar som pryl.
4. Installera dräner i leran mellan pålarna. Detta påskyndar ytterligare rekonsolideringen i den stör-

da jorden då dräner även är installerade direkt på pålarna.

5. Slå pålar med liten tvärsnittsarea av till exempel typ X-pålar. Detta reducerar den deplacerade jordvolymen. Kvoten mellan slagen pålvolum och uppburen last (m^3/kN) bör dock minimeras.
6. Slå "torra" pålar. Pålar av betong och trä bör med andra ord övertäckas vid lagerhållning på fabrik, under transport och på arbetsplatsen. Torra pålar påskyndar rekonsolideringsförloppet något runt pålen.
7. Slå pålarna i ett glest arbetsmönster med en successiv förtätning så att en viss del av porvattenövertrycket hinner rekonsolidera innan "grannpålen" slås. Alternativt kan man arbeta successivt inom olika delar av arbetsplatsen.
8. Undvik "onödig" stoppslagning, vilket kan ge upphov till onödiga horisontalsvängningar hos pålen.
9. Använd en fallhejare vilken ger en rak centrisk stöt för att undvika onödiga horisontalsvängningar i pålen.
10. Reducera hejarens fallhöjd.
11. Undvik dieselhejare när höga porvattenövertryck är kritiska.
12. Använd hydraulisk pressning för drivning av spont.

Reduktion av markhävningar och horisontalrörelser:

1. Dra lerproppar (se även ovan under reduktion av porvattenövertryck)
2. Slå pålar med liten tvärsnittsarea av till exempel typ X-påle.
3. Slå pålarna i riktning bort från det kritiska området som är känsligt för markhävningar och/eller sidorörelser. Hänsyn till oönskade sidorörelser av konstruktionspålar bör dock tas varför sådana pålar eventuellt måste slås i ett senare skede av pålningsarbetet.
4. Schakta före pålning. Detta ökar dock hävningarna i schakten. Vid detta förfarande är det även svårt att bedöma jordens kompressionsegenskaper i den del av undergrunden som utsatts för stora skjuvdeformationer varför man till exempel vid samverkansgrundläggning och kohesionspålegrundläggning kan erhålla större sättningar än förväntat. Ur sättningshänseende är det då bättre att först dra proppar och sedan slå pålarna från den ursprungliga markytan. Pålarna prylas ner till grundläggningsnivån, varefter schaktningen utförs.

5. Asfaltbeströkning av pålar reducerar effekten av negativ mantelfriktion när den av pålningsarbetet störda jorden rekonsoliderar.

5.7 PROGNOTISERING, KONTROLL OCH UPPFÖLJNING

En mätning av en viss parameter bör alltid grunda sig på en analys med vilken man satt för verksamheten aktuella gränsvärden. Utan sådana gränsvärden vet man inte hur mätningarna skall tolkas.

Är det omöjligt att sätta gränsvärden på till exempel maximalt tillåten deformation kan man istället aktivt styra arbetet genom att kontinuerligt följa upp förändringarna samt hur dessa påverkar omgivningen. Dessa observationer är då oftast av typen rörelseobservationer med hjälp av avvägning, inklinometermätning, inmätning av fasta dubbar med teodolit, rörelsemätning med till exempel teodolit och tumstock längs med inmätta siktlinjer, sprickbesiktning samt sprickviddsmätningar, slangställningsmätning, bälgsställningsmätning och avvägning av jordskruvar. Detta sätt att aktivt mäta förändringar relaterade till en viss verksamhet ger en god bild av rörelsemönstret hos omgivningen på grund av byggnadsverksamheten. Anledning till eftertanke finns framförallt om förändringen (rörelsen) inte avstannar när verksamheten upphör utan fortsätter att växa med tiden.

Noggranna mätningar och uppföljningar möjliggör även ett aktivt designtänkande där man kan optimera sina metoder och konstruktioner allt eftersom bygget fortskrider.

Vid mätning av parameterförändringar på grund av en viss verksamhet är det alltid viktigt att relatera förändringen till en opåverkad referens. En sådan referens är dock inte alltid konstant med tiden. När det till exempel gäller porvattentryck varierar dessa naturligt med årstid och nederbörd. Absoluta värden såväl som relativa värden på grund av verksamheten är med andra ord av intresse.

5.7.1 Porvattenövertryck

Prognostisering

De genom spont- och pålningsarbeten genererade porvattenövertrycken kan prognostiseras med hjälp av metoderna redovisade i kapitel 5.2.1 och 5.2.2. Metoderna ger en approximativ uppskattning av de genererade porvattenövertrycken i den störda plastiska zonen närmast spontens eller pålens mantelyta. Innehåller joden skikt med mer permeabla skikt kan

portrycken sprida sig över ett större område.

Kontroll och uppföljning

De genererade porvattentrycken kan mätas på sedvanligt sätt med portrycksmätare. Dessa bör vara av typen slutna system med kort responstid så att snabba förändringar kan registreras. Portrycksspetsarna bör installeras i de skikt och på de nivåer som i analysen bedömts som kritiska. Tremblay (1990) har utförligt beskrivit hur mätutrustning, mätpunkter och installationsdjup bör väljas.

I Skredkommissionens skrift "Övervakningssystem för lerslänter" har Ohlsson m. fl. (1994) beskrivit vilken typ av instrument som lämpar sig för sådana system samt hur planläggningen bör utföras.

Mätningarna bör vara kontinuerliga under slagningsarbetet så att uppehåll i arbetet kan beordras om porvattentrycken närmar sig de satta gränsvärdena. Stiger porvattenövertrycken upp mot de satta gränsvärdena bör de portrycksreducerande metoderna kompletteras och/eller omvärderas.

Portrycksmätningar bör i dessa sammanhang alltid kompletteras med någon eller några typer av rörelsemätning (se ovan).

5.7.2 Markhävning och sidorörelser

Prognostisering

Markhävningen och sidoförskjutningen kan prognostiseras med hjälp av den av Rehnman (1993) föreslagna metoden (se kapitel 5.3).

Kontroll och uppföljning

De vanligaste metoderna att registrera rörelser inducerade av jordundantäckning är avvägning och/eller koordinatbestämning av fast monterade mätdubbar med totalstation samt kontroll av inmätta siktlinjer. Krävs även en kontroll av rörelsernas fördelning på djupet kan detta göras med hjälp av bälgsställningsmätning och inklinometermätning. Dagvatten och avloppsledningars vertikalarörelser kontrolleras lättast med hjälp av slangställningsmätning.

Pålnings- respektive spontningsarbetet skall alltid föregås av en sprickbesiktning av närbelägna fastigheter. Vid behov kan det bli aktuellt att göra kontrollbesiktningar under arbetets gång. När arbetet är klart utförs en sedvanlig efterbesiktning.

Kapitel 6.

Buller utomhus och i byggnader

6.1 INLEDNING

Detta kapitel behandlar på vilket sätt buller och vibrationer från pål- och spontslagning påverkar människan jämfört med andra typer av störningskällor.

6.1.1 Bullrets störverkan

Buller från spontning och pålning vid slående neddrivningsmetoder uppträder normalt som serier av impulsbuller. Vibrerande neddrivning ger ett mera kontinuerligt ljud och bedöms därför på samma sätt som andra typer av byggbuller, med utgångspunkt från den ekvivalenta ljudnivån.

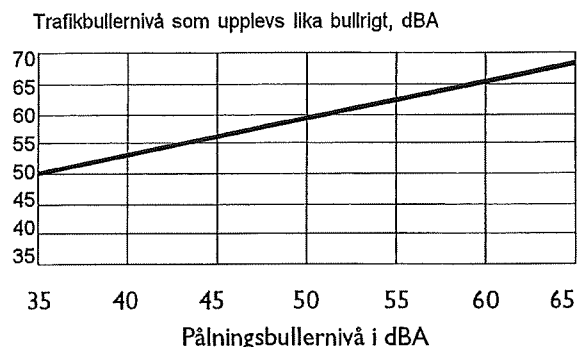
Hur störande ett ljud uppfattas beror inte enbart på de fysikaliskt mätbara parametrarna som ljudtrycksnivå, frekvensinnehåll, varaktighet för enskilda slag, antal slag i varje serie. Man måste också ta hänsyn till de psykologiska faktorer som förväntningar av buller i en given miljö. Samma buller stör olika mycket på olika platser vid olika verksamhet. Den enskilda personens uppfattning av bullret beror också på i vilken grad han tycker orsaken till bullret vara positiv eller negativ.

Ett stort antal undersökningar har gjorts för att utröna om den ekvivalenta ljudnivån från impulsljud motsvarar störintrycket. Man talar om tre olika nivåbegrepp:

- **Loudness** Mätbar ljudnivå
- **Noisiness** Subjektiv ljudnivå, "bullrighet". Olika ljudkällor med lika hög uppmätt ljudnivå kan upplevas olika bullriga.
- **Annoyance** Störintryck, i vilken grad man upplever sig störd av en viss typ av buller när man utför något arbete eller vilar.

I (Berry, BF, 1987) jämförs störintryck från vägtrafikbuller, pålslagning och konstgjorda impulsljud. Med det konstgjorda impulsljudet provades hur stör-

intrycket påverkas av avklingningstid, repetitionstid och differensen ($L_{\max, \text{peak}}$ - bakgrundsnivå). Endast för differensen ($L_{\max, \text{peak}}$ - bakgrundsnivå) kunde klara samband utläsas i störintrycket. En ökning av differensen med 10 dB ger en ökning av störintrycket med 4 dB. I figur 6.1 kan avläsas vilken trafikbullernivå som upplevs lika störande som en given bullernivå från pålning.



Figur 6.1. Ekvivalenta ljudnivåer med lika störintryck för pålning och trafikbuller. (Berry, 1987)

Flera undersökningar tyder på att man får en additionseffekt om människan utsätts för både ljud och vibrationer. Proven är svåra att utföra eftersom testpersonerna har svårt att värdera störintrycken från kombinerade störningar och några säkra samband finns inte redovisade. I Vibrationers inverkan på människan (1979). Berglund et al (1981) undersöktes om det finns någon additionseffekt när människan utsätts för buller från flera källor. Den mest användbara metoden visar sig vara att bedöma störintrycket efter den ljudkälla som avger högst ljudnivå.

Man provade också korrelationen mellan upplevd störning och olika mätbara storheter. Den storhet som bäst svarade mot upplevd störning var "ISO descriptor (X)". Den kan inte mätas med vanliga ljudnivåmätare utan analysen utförs i dator.

Undersökningarna visar alltså att störintrycket är större för påslagning än för kontinuerligt ljud som trafikbuller med samma ekvivalenta ljudnivå. Forskningsresultaten är inte entydiga och visar stor spridning. Ovan angivna värden för störintryck kan därför ej ses som absoluta värden tillämpbara i alla situationer.

6.1.2 Bullrets hörselskadeverkan

Bullerdosen är idag den allmänt vedertagna storheten för att bedöma risken för hörselskada. Bullerdosen eller bullerexpositionen för t ex 8 timmars arbetsdag mäts med en bullerdosimeter som mäter ekvivalent A-vägd ljudtrycksnivå L_{eq} i dBA. Enligt (Arbetskyddsstyrelsens Författningssamling AFS 1992:10) får L_{eq} ej överstiga 85 dBA för hel arbetsdag, om så är fallet skall åtgärder vidtas. Även inom EU är 85 dBA den accepterade hörselskaderiskgränsen, det är dock först vid bullerdoser på 90 dBA som åtgärder krävs. Sannolikt kommer Europarådet att få ta ställning till förslag om sänkning av hörselskaderiskgränsen till 75 dBA, vilket förmodligen kommer att leda till sänkning av den nivå för vilken bullerminskande åtgärder krävs.

En uppskattning av inom vilken radie från pålningen som bullret även kan vara en hörselskaderisk kan fås ur uttrycket nedan. Det är baserat på avgiven ekvivalent ljudeffektnivå L_w i dBA (se Appendix 2, Tabell A2.1), avstånd i m från ljudkällans centrum och effektiv drifttid t_{eff} i % av total arbetstid. Radien ligger vanligen i intervallet 10 - 30 m.

$$r = 10^{\left(\frac{L_w - 93 + 10 \cdot \log(t_{eff})}{20} \right)}$$

där r är avstånd i m från ljudkällans centrum.

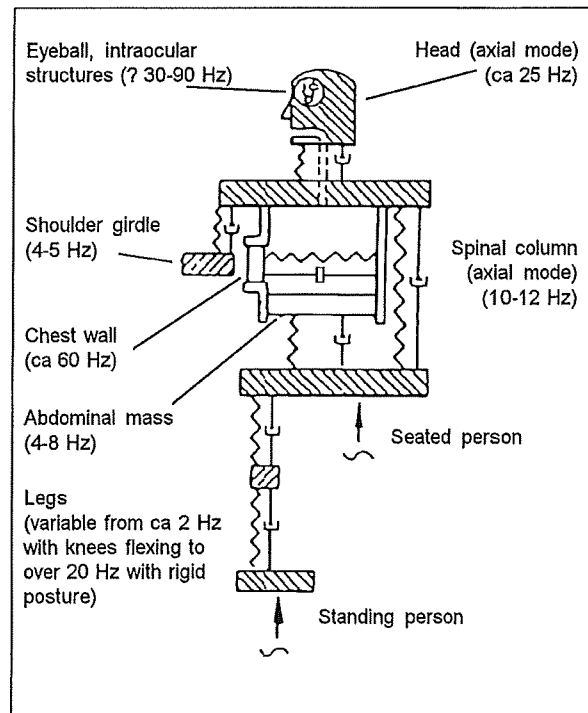
Det är först vid $L_{Maxpeak}$ -nivåer över 140 dBC (se Appendix 4) som man normalt behöver undersöka hörselskadeverkan från enstaka impulsljud. Enligt (Bennerhult, O, 1983) fås inte högre peaknivåer än 131 dBC på någon plats där personal normalt vistas. Vid den undersökningen provades fallhejare med betongpålar och stålspont samt tryckluftshejare med stålspåle. I de allra flesta fall av pålning eller spontning bör man därför kunna bedöma hörselskaderisken utifrån personalens bullerdos på samma sätt som för andra bullerkällor.

Det bör påpekas att höga ljudnivåer också kan öka risken för olyckor på arbetsplatsen genom att kommunikation mellan personal försvåras, varningssignaler maskeras och att bullret leder till trötthet och koncentrationssvårigheter.

6.1.3 Vibrationernas störintryck

En och samma vibrationsnivå uppfattas olika av olika människor. Störintrycket kan också variera med tiden på dygnet, man är vanligen mera lättstörd på morgonen eller kvällen än mitt på dagen.

Vibrationernas frekvens påverkar också hur de upplevs, människokroppens egna resonansfrekvenser kan förstärka obehaget av vibrationen, se figur 6.2.



Figur 6.2. Människans resonansfrekvenser. (Giacomelli, 1986)

Vibrationer uppfattas i viss mån även som varningssignaler och störningsgraden brukar minska när storkällan identifierats. Påslagning sker under längre tid och föregås av andra förberedande aktiviteter som uppmärksammar de boende om att verksamhet startat, och bör därför uppfattas mindre störande än till exempel sprängning.

Även här betyder information före arbetets start mycket för att minska irritationer. Det faktum att vibrationer som uppfattas av människan ligger långt under de nivåer som kan medföra skador på byggnader är viktigt att belysa. Känsltröskeln är ca 0,1 mm/s (hastighet) eller ca 3,2 mm/s² (acceleration).

En viss tillvänjningseffekt finns också. Människor uppväxta i stadsmiljö med vibrationer – till exempel från trafik – störs i allmänhet mindre av tillkommande vibrationskällor än människor som bor i en lugnare vardagsmiljö. (Parvin, N, 1983).

6.2 KÄLLDATA FÖR SPONT- OCH PÅLNINGSUTRUSTNING

6.2.1 Olika maskin- och påltyper

Vid litteratursökning har framkommit ljuddata för ett relativt stort antal maskintyper. Även andra metoder än de vanliga där påle eller spont drivs ner med slag eller vibrationer har tagits med för att visa alternativen och vad de innebär från bullersynpunkt. Ex på dessa är vattenjet, vibrereplacement och hydrauliska pressar.

En kort beskrivning av de maskintyper som tas upp här återfinns i appendix 2. En utförlig sammanställning av olika grundförstärkningsmetoder återfinns även i West (1981).

I tabell 6.1 visas de kombinationer av maskin och påle för vilka ljuddata sammanställts. I rutorna anges var i tabellen i appendix 2 som fullständiga ljuddata återfinns.

Genom att ljuddata härstammar från en stor mängd mättillfällen är det mycket svårt att utläsa driftparametrars inverkan på ljudnivån. Slagenergens inverkan till exempel, måste undersökas systematiskt vid ett tillfälle där alla andra parametrar hålls konstanta, lämpligen vid stoppslagning eftersom även pålens höjd ovan mark inverkar på ljudnivån.

Alla ljuddata redovisas som ekvivalenta ljudeffektnivåer, $L_{w,eq}$ i dBA. Med utgångspunkt från dessa kan sedan ljudtrycksnivån beräknas på önskat avstånd. Endast i ett fåtal referenser har både ekvivalent och maximal ljudnivå angivits. Skillnaden mellan maximala ljudeffektnivån $L_{w,max}$ och ekvivalenta ljudeffektnivån $L_{w,eq}$ är 10 - 15 dBA med instrumentrespons FAST och 20 - 25 dBA med PEAK. Värdena varierar mycket med neddrivningsmetod och slagfrekvensen.

Tabell 6.1. Kombination av neddrivningsmetod och spont/påle för vilka ljuddata återfinns i appendix 2.

	Spont/stålpålar				Betongpålar			Andra metoder		
	1 spont	2 spont	H-sekt.	Rör	Prefab.	Rör	Platsgj.	Sten-pelare	Slits-vägg	Kompakt-ering
Fallhejare	3	12	15	20	23	25	26			
Tryckluftshejare	7			21			29			
Tryckluftshejare dubbely.	8									
Luftimpulshejare dubbely.	9									
Hydraulisk hejare	5		16		24					
Dieselhejare	1		13	18	22					
Dieselhejare dubbelverk.	2		14	19						
Ånghejare										
Bottendriven hejare				17						
Vibrohejare	10						30			
Sonic	6									
Hydraulisk press	4									
Jordbör diesel							28			
"Impact bored"							27			
Vattenjet	11									
Vibrereplacement								31		
Fallgrävare									32	
Hydraulisk dikesgrävare									33	
Fallvikt										34
Kringutrustning										35

Ljudnivån varierar under neddrivningen. Huvudsakligen orsakas förändringen av att fri spont/pållängd minskar vilket ger sjunkande ljudnivå, drivningsmotståndet ökar däremot vilket ger stigande ljudnivå om neddrivningsenergin ökas. Dessa effekter tar i allmänhet inte ut varandra helt varför variationer ändå uppstår under neddrivningen.

Fria längden ovan mark betyder mer vid spontning än vid pålning. Vid sättning av sammanhängande spontvägg med stor fri yta kommer därför ljudavgivningen att bli större än om alla spont slås ner till marknivå eller om sponten kapas. För pålningen betyder det ökade drivningsmotståndet mer, det är först när nästan hela pålen är nedslagen som utstrålningen från pålen minskar nämnvärt. Jfr mätresultaten i figur 6.3.

6.2.2 Framtagning av källdata genom ljudmätning

Vid fall då ljuddata saknas i appendix 3, kan ljuddata tas fram genom mätningar vid provpålning/spontning inför ett projekt. Det kan vara fördelaktigt att mäta ljudnivåer även i fall där ljuddata finns, till exempel om beräkningarna visar att man ligger nära gällande gränsvärden. Säkrare ljuddata kan då fås för den kombination av maskin/påle/marktyp som skall användas.

Ljudmätningar på pålningsutrustning kan göras i flera syften, man talar om två olika mätprinciper. Emissionsmätning (källstyrka) och immissionsmätning (resulterande ljudnivå i en punkt i omgivningen).

Typ A; emissionsmätningar med höga krav på mät-noggrannhet

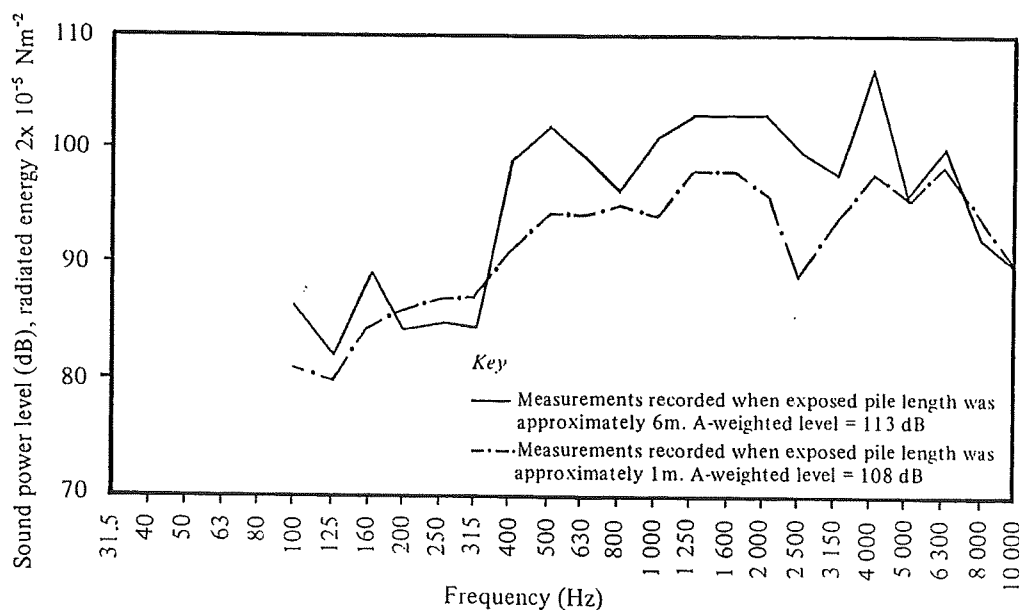
Används för att noggrant bestämma ljudeffektdata för en bullerdeklaration till exempel för CE- märkning. Denna typ av emissionsmätningar kräver att alla parametrar som påverkar ljudeffektnivån är kända och väldefinierade.

Typ B; emissionsmätningar med normala krav på mät-noggrannhet

Används till exempel för att ta fram källdata för att använda i predikteringsmodell som den här presenterade, när man behöver kunna beräkna ljudnivåer på många olika platser inför ett grundläggningsprojekt.

Typ C; immissionsmätningar

Ger direkt svar på om uppställda ljudkrav kan innehållas utanför och inne i specifika byggnader. Metoden kan användas om endast ett fåtal likartade byggnader (lika ljudisolering och stomkonstruktion) ligger inom området där störningar bedöms kunna uppträda.



Figur 6.3. Frekvensanalys av ljudnivån 1 m från spontning. (Weltman, 1980)

6.3 INVERKANDE FAKTORER FÖR LJUDUTBREDNING UTMOMHUS

I detta kapitel behandlas de faktorer som påverkar ljudet sedan det lämnat källan tills det når en mottagare utomhus, så kallad frifältsutbredning. Faktorerna baseras bland annat på förslaget till standard ISO/DIS 9613-2 "Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors".

Metoden är här presenterad för att beräkna totala ljudtrycksnivåer i dBA. (I de fall dämpfaktorerna är frekvensberoende har formler ställts upp för beräkning vid 500 Hz.)

Modellen avser ljudutbredning under medvindsförhållanden, dvs värsta fallet:

- vindriktning från källa till mottagare $\pm 45^\circ$
- vindhastighet ca 1 - 5 m/s

Noggrannheten anges till ± 3 dB för avstånd under 1 km. För andra väderbetingelser kan ingen säker påverkan på ljudutbredningen kalkyleras.

Avståndet mellan källa och mottagare varierar i hög grad på en byggarbetsplats. Ena dagen sker spontning i en del, nästa dag i en annan. Det är därför lämpligt att med hjälp av uppgjord tidplan utföra beräkningar för en rad arbetspositioner och den mottagarpunkt som för varje arbetsposition utsätts för högst ljudnivå. Man kan dock inte alltid utgå ifrån att högst ljudnivå fås vid de byggnader som ligger närmast ljudkällan. Skärmningseffekter och ljudisolerande egenskaper hos byggnader kan påverka ljudnivån mer än avståndet.

Ljudtrycksnivån $L_{A,ute}$ från en ljudkälla utomhus kan beräknas ur avgiven ljudeffekt L_w samt ett antal korrekationer A som baseras på avståndet från ljudkällan samt omgivningens beskaffenhet.

$$L_{A,ute} = L_w - A_{avst} - A_{rikt} - A_{atm} - A_{mark} - A_{refl} - A_{skärm} - A_{övrig}$$

där

- L_w är källans ljudeffekt se 6.2
- A_{avst} är avståndsdämpning se 6.3.1
- A_{rikt} är riktningsverkan se 6.3.2
- A_{atm} är atmosfärsdämpning (luftabsorption), se 6.3.3
- A_{mark} är markdämpning se 6.3.4
- A_{refl} är korrekationer för reflekterande ytor, se 6.3.5
- $A_{skärm}$ är skärmdämpning se 6.3.6
- $A_{övrig}$ är dämpning på grund av andra faktorer, vegetation, bebyggelse etc 6.3.7

6.3.1 Avståndsdämpning

Med avstånds- eller geometrisk dämpning menas den ljudtrycksnivåminskning som uppstår med ökande avstånd från källan genom att källans avgivna ljudeffekt sprids över allt större yta. För större avstånd kan pålningsutrustningen i allmänhet betraktas som en punktkälla vars ljudeffekt sprids ut på en halvsfär.

Vilket ger:

$$A_{avst} = C_{avt} \cdot \log d + 8 \text{ dB}$$

där

d = avstånd till ljudkällan i m.

C_{avt} är en faktor som antar följande värden

Tabell 6.2. Konstant för avståndsdämpning C_{avt} vid olika utbredningsförhållanden.

Ljudutbredningsförhållande	C_{avt}
- Frifält utan reflekterande ytor i närheten, se 6.3.5: för def.	20
- Normal stadsbebyggelse	17
- Smal gata (6 m)	13

Om C_{avt} väljs till annat värde än 20 skall A_{refl} (punkt 6.3.5) sättas lika med 0 dB eftersom ett schablonvärde för ett antal reflexer redan inkluderats.

Korta avstånd

Vid vilket avstånd d man kan se pålningsutrustningen som en punktkälla beror på dess höjd. Höjd 5 m ger $d > 6$ m, höjd 10 m ger $d > 20$ m och höjd 15 m ger $d > 30$ m. Befinner sig mottagaren inom kortare avstånd används följande formel:

$$A_{avst} = C_{avt} \cdot \log d + 8 - K_{lk} \text{ dB, där}$$

$$K_{lk} = 10 \cdot \log \left[\frac{\arctan\left(\frac{l}{d}\right) \cdot \pi \cdot d}{l \cdot 180} \right] \text{ dB}$$

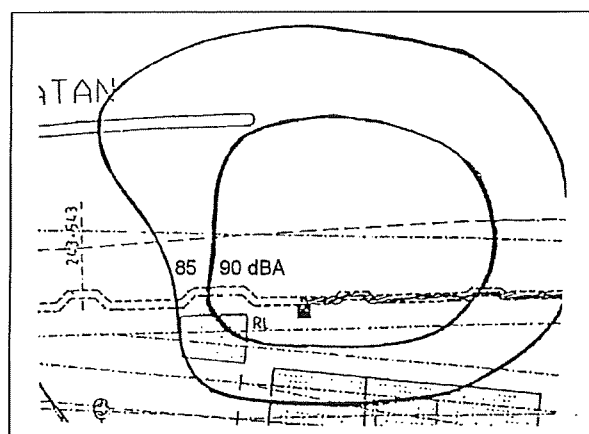
l = ljudkällans höjd i m.

I appendix har formeln beräknats för olika värden på d och l .

Spontväggar

Vid slående spontning i en sammanhängande spontvägg där spontan sticker upp några meter ur marken

fungerar de som en strålände yta. Ljudutstrålningen avtar med avståndet från den slagna sponten. Hur snabbt avtagandet sker beror på spontens längd ovan mark, markförhållanden och hur väl sponten är kopplade till varandra. Framförallt på korta avstånd kommer en spontvägg att påverka riktningsverkan hos ljudutstrålningen. Befinner man sig nära spontväggen kommer ljudnivån att bli högre än om man befinner sig på samma avstånd från slagstället på andra sidan maskinen. Se exempel på ljudmätning i figur 6.4.



Figur 6.4. Ljudnivåkurvor som visar hur ljudutbredning runt en fallhejare påverkas av redan satta spont (Erixon, 1987)

Ljudutstrålningen från själva pålen är betydligt mindre än från slagstället och övriga delar av pålkranen (Bennerhult, O, 1983). Ett spont strålar mer ljud än en betongpåle, men förhållandet är förmodligen ungefär detsamma dvs att ljudet från slagstället och pålkranen dominerar över bidrag från spont och spontvägg.

Det går inte med det underlag som framkommit att göra någon generell modell för hur stor ljudutstrålningen från en spontvägg blir jämfört med slagning av enstaka spont. För att klargöra dessa effekter måste vibrationsmätningar utföras på en spontvägg på olika avstånd från spontstället. Alternativt utföres mätningar runt maskinen i inledningen av ett projekt när 10 - 20 m spontvägg står färdig, för att kunna prediktera ljudnivån i senare skeden av projektet.

6.3.2 Rikttningsverkan

Med riktningsverkan menas att ljudutstrålningen i olika riktningar från en ljudkälla inte är lika stor. Ofta beror det på hur den dominerande ljudalstringen (slagstället) skärmas av maskinen. Rikttningsverkan kommer därför bland annat att variera med slagställets

höjd ovan mark. I figur 6.4 ovan är ljudnivån framför maskinen ca 8 - 10 dB högre än bakom maskinen.

En genomgång av mätresultaten i (Bennerhult, O, 1983) visar ett ungefärligt riktningsberoende enligt tabell 6.3. Mätningarna är utförda på fall- och tryckluftshejare med stål- resp. betongpåle samt spont. Man kan förmoda att detta till viss del beror på att avstånden till själva slagstället (pålhuvudet) varit olika vid mätning framför och bakom maskinen.

Bedömer man att utrustningens ljudutstrålning är riktningsberoende och kommer att ha samma riktning i förhållande till närmaste byggnader under hela dagar kan man använda schablonvärdena i tabellen nedan för att korrigera för riktningsverkan.

Tabell 6.3. Korrektionsfaktor för olika riktningsinverkan.

Mottagarens pos. i förhållande till pålningsutrustningen	Korrektion för riktningsverkan A_{rikt} dB
Framför maskinen	-2
Till höger eller vänster om	0
Bakom maskinen	+6

6.3.3 Atmosfärsdämpning

Atmosfärsdämpning orsakas av att luften absorberar en liten del av ljudenergin när den fortplantar sig från källa till mottagare och är avståndsberoende. Vid avstånd under 500 m är avståndsdämpningen försumbar för ljudkällor aktuella här.

A_{atm} är atmosfärsdämpningskoefficient i dB/km som är kraftigt frekvensberoende. I tabell 6.4 anges A_{atm} som funktion av temperatur t i $^{\circ}\text{C}$ och relativ luftfuktighet RH i % vid frekvensen 500 Hz.

Tabell 6.4. Konstant för atmosfärsdämpning A_{atm} vid olika temperaturer och luftfuktighet.

t ($^{\circ}\text{C}$)	RH (%)	A_{atm} (dB/km)
10	70	1,93
20	70	2,80
30	70	3,14
15	20	2,70
15	50	2,24
15	80	2,40

6.3.4 Markdämpning

Markdämpning är egentligen interferens mellan direktljud och ljud som reflekterats i marken och beror i huvudsak på markförhållandena nära källa och mottagare.

$$A_{\text{mark}} = 4,8 - \left(\frac{2 \cdot h_m}{d} \right) \cdot \left[17 + \left(\frac{300}{d} \right) \right] \text{ dB}$$

Där h_{medel} är medelhöjd i m ovan mark för en linje mellan källa och mottagarpunkt.

$$h_{\text{medel}} = \frac{h_k + h_m}{2} \text{ m}$$

h_k = källhöjd i m, h_m = mottagarhöjd i m.

Om $A_{\text{mark}} < 0$ skall A_{mark} sättas till noll.

Då källhöjden varierar allteftersom en påle slås ner i marken föreslås ett schablonvärde h_k = pålhöjden/3 (om man antar att neddrivningshastigheten minskar linjärt med påldjupet). Mottagarhöjden är i allmänhet 1,5 m för ljudkrav utomhus; i annat fall exponerade fönsters höjd ovan mark, beroende på hur ljudkraven ställts.

6.3.5 Reflekterande ytor

Med reflekterande ytor avses här nästan vertikala ytor som till exempel husfasader.

Korrektion för reflekterande ytor skall göras då:

1. en reflektionslinje ($d_{kr} + d_{rm}$) kan ritas upp, se figur 6.5.
2. reflektionsfaktorn r är större än 0,2, se tabell 6.5.

$$3. \frac{a_{\text{refl}} \cdot \cos b \cdot (d_{kr} + d_{rm})}{(d_{kr} \cdot d_{rm})} > 1,3$$

där a_{refl} är den reflekterande ytans area

$$4. d_{kr} + d_{rm} < 2 \cdot d$$

Är något av kraven ej uppfyllt sätts $A_{\text{refl}} = 0$, annars beräknas A_{refl} på något av följande sätt:

1. En reflekterande yta
2. Flera reflekterande ytor
3. Många reflekterande ytor

1. En reflekterande yta

$$A_{\text{refl}} = -10 \cdot \log(1 + r) \text{ dB}$$

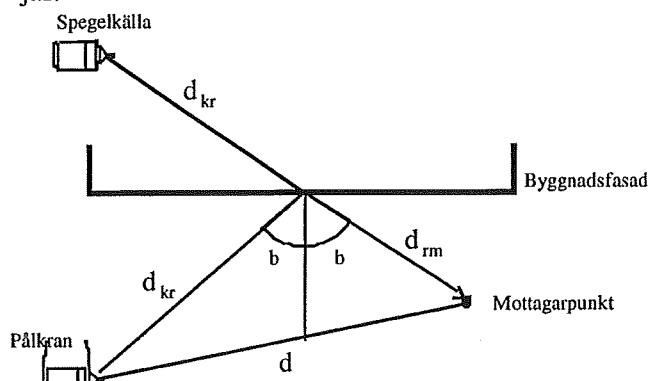
Exempel på reflektionsfaktorer r ges i tabell 6.5.

Tabell 6.5. Exempel på reflektionsfaktorer.

Reflekterande yta	r
- Släta hårda väggar	1,0
- Byggnadsfasad med fönster och små nischer eller utbyggnader	0,8
- Fabriksvägg där 50% av ytan består av öppningar, installationer eller rör	0,4

2. Flera reflekterande ytor

Finns flera reflekterande ytor i närheten skall spegelkällor utnyttjas. Förutom bidraget från den verkliga källan skall bidragen från den tänkta spegelkällan beräknas för sig, se figur 6.5. Finns en skärm mellan källa och mottagare skall också spegelkällor utnyttjas.



Figur 6.5. Reflekterande yta och tänkt ljudstråles väg.

Spegelkällans ljudeffekt L_{Wsk} blir

$$L_{\text{Wsk}} = L_{\text{W}} + 10 \cdot \log r \text{ dB}$$

och har i övrigt samma källegenskaper som den verkliga källan med ljudeffektnivå L_{W} . Övriga dämpfaktorer kan dock avvika eftersom ljudvägen blir annorlunda än den verkliga källans.

3. Många reflekterande ytor

Finns många reflekterande ytor på nära håll kan dessa inkluderas genom att välja faktor, C_{avt} för geometrisk dämpning enligt beskrivning under avsnitt 6.3.1 Avståndsdämpning. A_{refl} sätts då lika med 0 dB.

6.3.6 Skärmdämpning

Skärmdämpning fås då ett hinder skymmer direktvägen för ljudet mellan ljudkälla och mottagare. Graden av dämpning beror på skärmens storlek och dess placering i förhållande till ljudkälla och mottagarposition. Att något ljud överhuvudtaget når mottagaren beror på att ljudvågorna böjer av runt kanterna på skärmen (och ev. reflekterande föremål i närheten). För att skärmdämpning skall kunna tillgodoses måste skärmen vara tät utan stora springor och ha en ytvikt $> 10 \text{ kg/m}^2$. Nedan beskrivs en förenklad beräkningsmetod, se *figur 6.6*.

Den förenklade metoden är hämtad ur (Falch, 1984). Alla skärmar betraktas som tunna skärmar. Om skärmbredd och höjd varierar används ett medelvärde.

- Först bestäms B som är lika med den kortaste av längderna B_1 och B_2 i m.
- Källhöjd h_k bestäms som höjden för den högst belägna dominerande ljudkällan i m.
- Effektiv skärmhöjd H bestäms som höjd ovan siktlinjen i m.
- d_{ks} är avståndet mottagare - skärm och d_{sm} avståndet skärm - mottagare i m.

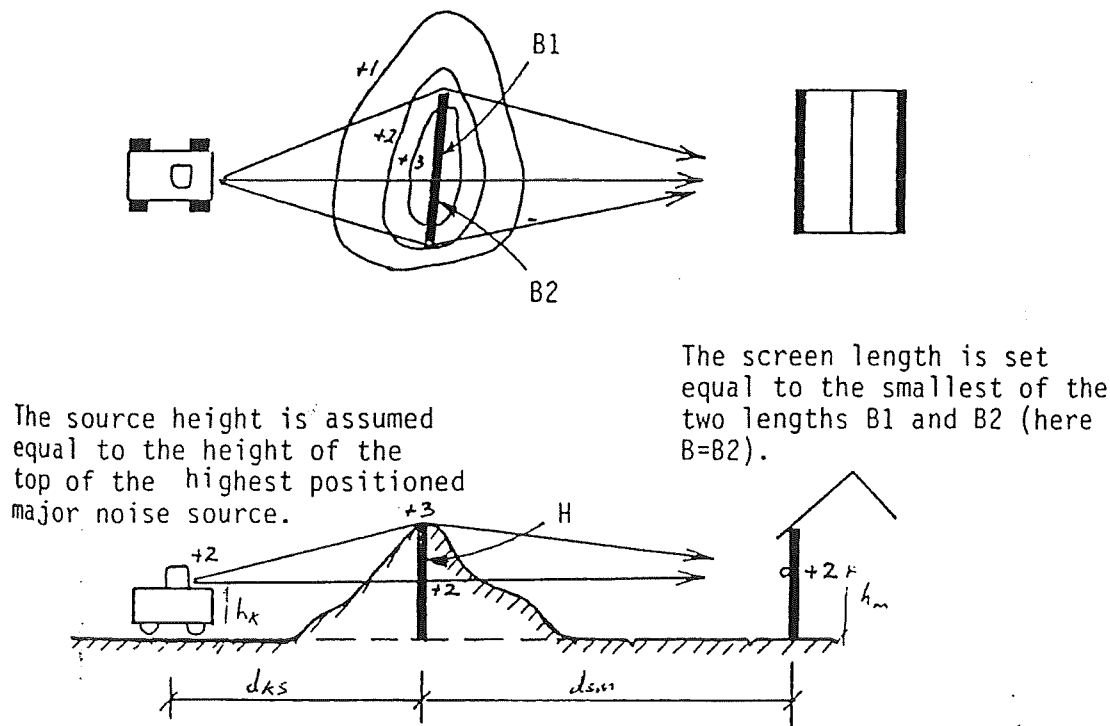
Tabell 6.6. Skärmdämpning som funktion av avståndet beskrivna i figur 6.6

Skärmdämpning $A_{skärm}$ i dB			
Kortaste av längderna H och B i m	Kortaste av avstånden d_{ks} och d_{sm} i meter		
	≤ 3	15	50
< 0	0	0	0
0	-4	-2	0
0.5	-7	-5	-3
1	-10	-8	-6
2	-14	-12	-9
4	-19	-16	-12
8	-25	-20	-15

Skärmdämpningen kan beräknas mer exakt. Detta bör överlåtas till specialist.

6.3.7 Övriga faktorer

Med övriga faktorer menas här till exempel meteorologiska faktorer och spridning av ljudet i vegetation, bostads- och industribebyggelse. Beräkning för medvindsfallet innebär att det mest kritiska fallet studeras, dvs högst ljudnivå uppträder hos mottagaren. Att uppskatta inverkan av andra meteorologiska förhållanden ger mycket osäkra resultat som ej kan användas för jämförelse med kravvärde.



Figur 6.6. Definition av nödvändiga avstånd B_1 , B_2 , H , d_{ks} , d_{sm} , h_k och h_m . (Falch, 1984)

Då man i de flesta fall är intresserad av ljudnivån vid närmaste bostadsbebyggelse kan det vara aktuellt att uppskatta dämpningen av ljudet då det passerar genom vegetation eller industribebyggelse. Det är emellertid komplicerat att beskriva de exakta omständigheterna och därmed hur ljudet påverkas. Mätningar av dämpeffekten är därför att föredra. Vill man göra en enkel uppskattning kan följande värden användas:

- **Industribebyggelse:** $A_{\text{övrig}} = 0,05 \cdot d_{\text{industri}}$ dB, dock högst 10 dB. d_{industri} är ljudets gångväg i m genom industribebyggelse.
- **Vegetation:** dämpning kan påräknas endast om vegetationen är tät och medger kort sikt. d_{veget} är ljudets gångväg i m genom vegetation.

$A_{\text{övrig}} = 1$ dB om d_{veget} är 10 - 20 m

$A_{\text{övrig}} = 0,05 \cdot d_{\text{veget}}$ dB om d_{veget} är 20 - 200 m

$A_{\text{övrig}} = 10$ dB om d_{veget} är större än 200 m

6.4 LJUDISOLERING HOS FASADER

Ljudtrycksnivån i en byggnad i närheten av ett spont/pålningsarbete kan bestå av ljudbidrag som fortplantats två spridningsvägar; luftljud via fasadvägg samt stomljud som alstrats av markburna vibrationer. Vilken av transmissionsvägarna som blir bestämmande för ljudnivån inomhus beror på rummets läge i byggnaden samt avstånd till spont/pålningsplatsen. I de flesta fall dominerar luftljudet via fasad, i praktiken oftast via fönster och friskluftsintag. Några lätta väggtyper som dock inte har så hög ljudisolering är till exempel sandwichelement med styropor- eller uretanskumisolering, (lättbetong-plåtelement etc) och träpanelväggar av regeltyp. Dvs väggar som inte innehåller något tungt skikt som tegel eller betong. Vid lättväggar bör en kontroll utföras av att inte väggens ljudisolering påverkar den sammanlagda ljudisoleringen.

Vid korta avstånd mellan arbetsplats och byggnad eller då inga fönster vetter mot arbetsplatsen, kan stomljud ge det största bidraget till ljudnivån inomhus.

Luftljudsisoleringen i byggnad (fältreduktionstal) för en given konstruktion anges med ett vägt entalsvärde R'_{w} i dB. För fasadkonstruktioner anges ofta även ljudnivåskillnad mellan ljudnivå ute och inne när bullret kommer från trafik, $R_{\text{A,tr}}$ i dBA. Detta värde måste korrigeras för aktuell fasadarea och rumsabsorption för att ge verklig ljudnivåskillnad. $R_{\text{A,tr}}$ har här valts för att beräkna fasadisolering även mot pål- och spontningsbuller då det ger bättre överensstämmelse än att räkna med R'_{w} . Alternativet att räkna på reduktionen i varje frekvensband för sig innebär att även källdata och alla dämpningsfaktorer måste beräknas i frekvensband, vilket ger en betydligt mer tidskrävande beräkning som inte är motiverad med tanke på att osäkerheten i källdata vanligen är stor.

6.4.1 **Ljudisoleringsdata för fasadväggar**
Följande värden, som hämtats från Benjegård (1987), kan användas som schablonvärden om mätdata saknas för aktuell väggtyp:

Väggtyp	$R_{\text{A,tr}}$ i dBA
1 1-sten tegelvägg, putsad invändigt (+ värmeisol.)	50
2 20 cm putsad betongvägg (+ värmeisol.)	50
3 Lättbetong, 15-25 cm	35-40
4 10-12 cm regeltvägg, enkelt regelsystem, mineralull i luftspalten. 12 mm spånskiva invändigt 25 mm lockad träpanel utvändigt	30
5 Som 4, men med yttre skikt av 60 mm fasadsten	40
6 Som 4, men med ytterskikt av 120 mm fasadsten	45
7 15-20 cm regeltvägg, korslagt regelsystem, mineralull i luftspalten. 12 mm spånskiva invändigt 9 mm utegips som vindskiva. 25 mm lockad träpanel utvändigt	40
8 Som 7, men med yttre skikt av 60 mm fasadsten	45
9 Som 7, men med yttre skikt av 120 mm fasadsten	45-50
10 Som 7, men med yttre skikt av 0,5 m Al-fasadplåt	35
11 7,5 cm plankvägg, med inre skikt av 5 mm masonit och yttre skikt av 25 mm lockad träpanel	25-30

Vid väggtyperna 4-10 förutsätts att luftspalten är fylld med mineralull. Andra material till exempel wellpapp och sågspån (sjunker ihop) ger konstruktiv en sämre ljudreduktion.

6.4.2 Ljudisolering hos fönster

Ljudisoleringen hos fönster är i första hand betingad av glasavstånd och täthet. Stort glasavstånd (80-100 mm) mellan yttre och inre glas ger god isolering, tre glas i sig ger liten fördel. Ljudisoleringen hos ett fönster kan ändras med tiden beroende på typ av tätningsslistor och i vilket skick dessa befinner sig. Nedan redovisas värden som kan användas i brist på säkrare mät- eller katalogdata (Benjegård, S-O, 1987).

Fönstertyp	$R_{A, tr}$ i dBA Bra tätning	Dålig tätning
1. Tvåglasfönster, äldre konstruktion	22	17
2. Tvåglasfönster, äldre konstruktion + tillsatsruta	25	20
3. Treglasfönster isolerruta - med 3 mm glas	28	23
4. Treglasfönster, isolerruta med 4 mm glas, "enkla" ljudruta	31	26
5. Treglasfönster i 2 bågar, bättre ljudrutor	34	29
6. Treglasfönster i 2 bågar, dubbelfalsad, tätning mellan båg/båge och båg/karm, ett stort glasavstånd, min 70 mm, tjocka glas. Ev. är ytterbågen av aluminium.	37	32

För att fönstertyperna skall uppnå redovisad ljudisolering fordras att de är väl monterade och vältätade.

6.4.3 Ljudisolering hos friskluftsdon

Friskluftsventiler kan - om de inte är utförda med tanke på god ljudisolering - väsentligt minska totala ljudisoleringen för fönster. I äldre hus med öppna odämpade ventiler kan man för fönster och don tillsammans ofta inte räkna med $R_{A, tr}$ mer än ca 20 dBA.

I moderna hus är friskluftsdonen ofta placerade på gårdssidan för att minska buller och avgasproblem. Ett väl dämpat don kan ha $R_{A, tr}$ mellan 25 och 35 dBA, angivet för 2 m² referensarea.

För ljuddämpade don som säljs idag redovisas ljudisoleringen ofta som ljudnivåskillnad $R_{A, tr}$ i dBA. Väsentligt är att observera att angiven referensarea för donen i allmänhet inte är donens verkliga area, utan oftast 2 m² men på senare tid även 10 m². Ljudisoleringen kan sättas 7 dB högre för ett och samma don om 10 m² referensarea används istället för 2 m². Innan beräkning av resulterande ljudnivåskillnad för fasadvägg inklusive fönster och don utförs omvandlas donets $R_{A, tr}$ till att gälla donets verkliga area med formeln

$$R_{A, tr} = R_{A, tr, ref. area} + 10 \cdot \log\left(\frac{\text{verklig area}}{\text{ref. area}}\right) \text{ dBA}$$

där

$R_{A, tr, ref. area}$	är ljudnivåskillnad i dBA med angiven referensarea
Verkl. area	är donets verkliga area i väggen i m ² (öppen area)
Ref. area	är den area i m ² som anges för uppgiven ljudnivåskillnad för donet

6.4.4 Beräkning av luftljudsnivån i byggnad

Inomhusljudnivån $L_{A, inne, luft}$ i dBA orsakad av luftljud beräknas genom att ifrån ljudtrycksnivån ute (frifältsnivån) $L_{A, ute}$ i dBA subtrahera korrektionen K_{fasad} .

$$L_{A, inne, luft} = L_{A, ute} - K_{fasad} \text{ dBA}$$

där

$$K_{fasad} = R_{A, tr, res} - 10 \cdot \log\left(\frac{S_{tot}}{A}\right) - 3 \text{ dB}$$

där

$R_{A, tr, res}$ är resulterande ljudisolering i dBA fasadvägg inklusive fönster och friskluftsdon

S_{tot} är verklig area i m² för fasaden i ett rum

A är rummets absorptionsyta i m² Sabine, för ett normalmöblerat rum (höjd 2,4 m) kan man anta $A = \text{Golvarea} \cdot 0,8 \text{ m}^2$ Sabine, vilket motsvarar en efterklangstid på 0,5 s.

Den resulterande ljudisoleringen $R_{A, tr, res}$ kan approximativt beräknas med formeln nedan (beräkningarna skall för att ge helt korrekta värden utföras för reduktionstal i varje enskilt frekvensband var för sig):

$$R_{A, tr, res} = 10 \cdot \log\left[\frac{S_1 + S_2 + S_3}{\left[S_1 \cdot 10^{-\frac{R_{A, tr, 1}}{10}} + S_2 \cdot 10^{-\frac{R_{A, tr, 2}}{10}} + S_3 \cdot 10^{-\frac{R_{A, tr, 3}}{10}}\right]}\right] \text{ dB}$$

där

- S_1 , S_2 och S_3 är delytorna i m² hos resp. byggnadsdel till exempel vägg, fönster, friskluftsintag (don).
- $R_{A, tr, 1}$, $R_{A, tr, 2}$ och $R_{A, tr, 3}$ är resp ljudnivåskillnad utenvå - innenvå i dBA vid trafikbuller.

6.5 STOMLJUD I BYGGNADER ORSAKADE AV MARKVIBRATIONER

Vid litteratursökningen har inga referenser framkommit med mätresultat där buller inomhus orsakat enbart av stomljud från pål/spontslagning har mätts upp. I de fall mätningar finns, går det inte att skilja på luft- och stomljudsbidrag.

När det gäller utbredningen av vibrationer i en byggnadskropp har DNV Ingemansson AB utvecklat en beräkningsmetod som möjliggör beräkning av stomljudsnivåer, exempelvis i rum på olika våningsplan. Metoden används bland annat för beräkning av stomljud i bostadshus belägna över järnväg/tunnelba-

na. Syftet är att beräkna förväntade bullernivåer inne i byggnader baserat på predikterade eller uppmätta nivåer för horisontella och vertikal vibrationer i byggnadens fundamentering.

För stomljud (A-vägda ljudnivåer inomhus) är det i allmänhet stomvibrationer inom frekvensområdet 31,5 - 125 Hz som är avgörande. Vid lägre frekvenser uppfattas störningarna endast som vibrationer, högre upp i frekvens är dämpningen i marken stor, varför vibrationsnivån i byggnaden blir liten.

Byggnadskonstruktion: typfall

Den använda metoden är komplicerad och beräkningar har därför utförts för ett typfall.

Byggnaden förutsätts vara ett bostadshus med källare och 6 våningsplan. En planyta om 20 m ggr 20 m har använts vid beräkningarna. Huset förutsätts inledningsvis vila på skikt av moränlera utan pålar; inverkan av pålning diskuteras nedan.

Huset förutsätts vidare vara uppbyggt med bärande väggar och fasader i betong. Väggarna vilar på 600 mm breda grundsulor. Avståndet mellan bärande väggar är 4 m. Marken ligger an mot källarväggarnas sidor. Väggar och bjälklag förutsätts vara av armerad betong och lika tjocka; en tjocklek om 200 mm har använts vid beräkningarna. Denna tjocklek är dock inte särskilt kritisk för resultatet så länge väggar och bjälklag har samma tjocklek. Husets massa har satts till 3500 ton.

En jämförelse har även gjorts med ett kontorshus med bärande pelare som givit en 2 dB lägre nivå för kontorshuset. Denna skillnad är dock ganska känslig för c/c-avståndet mellan pelarna, vid tät pelardelning erhålls högre nivåer.

Det skall också observeras att den byggnadstekniska utformningen i vissa fall har stor betydelse för uppträdande bullernivåer. Detta diskuteras vidare nedan.

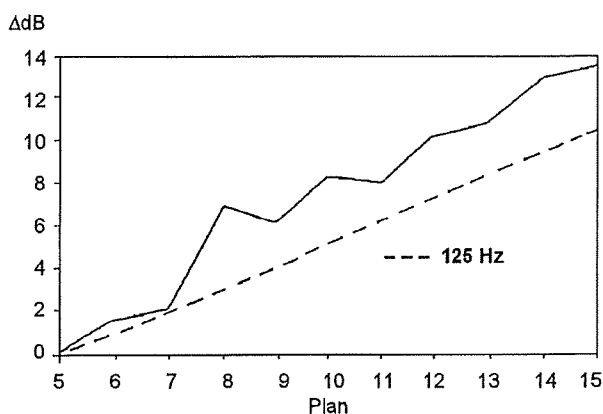
6.5.1 Stomljud alstrat av vertikala vibrationer

Tidigare utförda mätningar visar att stomljudet normalt transmitteras från marken in i och upp genom det aktuella huset i form av longitudinella vågor i byggnadsstommen. Detta medför att marksvängningar i vertikal riktning är viktigare för bullret inne i huset än horisontella svängningar.

För de här aktuella beräkningarna har utnyttjats ett medelvärde av mätresultat erhållna i några byggnader i Stockholm, samtliga med bärande väggar. Detta medelvärde avser differensen i vertikal vibrations-

hastighetsnivå mellan grundsula och en punkt mitt på det bjälklag som ligger direkt över husets bottenplan. Modellen är tillämplig på en struktur där alla våningsplan i byggnaden är lika (strukturen måste vara periodisk) och bygger på den "Kettenleiter-teori" som i princip redovisas i (Cremer, 1967), men för andra applikationer. Figur 6.7 visar mätt utbredningsdämpning vid 125 Hz i ett höghus (Plaza Hotel i Oslo) tillsammans med beräknade värden (Ljunggren, 1990).

Utstrålningen av hörbart stomljud förutsätts ske från bjälklagen under och över det aktuella rummet.



Figur 6.7. mätta — och beräknade - - - värden för dämpning av longitudinella vibrationer i ett höghus.

Ingen hänsyn tas här till inverkan av utstrålning från bärande väggar. Det har nyligen visats (Ljunggren, S, 1993), att strålningsfaktorn i fall som detta är väsentligt större än vad som tidigare antagits. För detta syfte bedöms därför ett värde på 1,0 vara rimligt.

Den ekvivalenta absorptionsytan förutsätts vara 0,8 m²/m² golvyta. Detta motsvarar en efterklangstid på 0,5 s vid en takhöjd på 2,40 m vilket är ett vanligt värde i normalt möblerade bostäder.

Beräkningar utförda på detta sätt kan vid ogynnsamma förutsättningar ge för låga nivåer, exempelvis om resonansfrekvenserna för en viktig rumsmod stämmer överens med en bjälklagsresonans. Att ta hänsyn även till detta skulle dock göra modellen alltför komplicerad.

6.5.2 Stomljud alstrat av horisontella vibrationer

I de nedre delarna av huset kan även marksvängningens horisontalkomponent bli viktig för bullernivån speciellt om marken ligger an mot källarväggen där tvungna böjvågor uppstår i källarmurarna. Dessa vågor fortplantas sedan på konventionellt sätt som böjvågor upp i huset (flanktransmission). Knutpunktsförlusten R blir dock något mindre i detta fall än i normalfallet eftersom hela källarväggen kommer att svänga konfast. För en knutpunkt bestående av 4 st 160 mm tjocka betongplattor är den 6 dB i stället för 8 dB över hela frekvensområdet. För knutpunkter högre upp i huset används det högre värdet.

Avstrålningen förutsätts i detta fall ske från underliggande bjälklag och en vägg. Samma rumsabsorption förutsätts som i ovanstående fall.

6.5.3 Beräkningsmodell för stomljud

Ljudnivån inomhus från stomljud $L_{A, \text{inne, stom}}$ byggs upp av bidrag från vertikala och horisontella vibrationer i byggnadsgrunden med vibrationshastighetsnivåerna, $L_{v, \text{vert, gr}}$ och $L_{v, \text{hor, gr}}$ angivna i dB rel. $5 \cdot 10^{-8}$ m/s. Rummens dimensioner benämns $B \times L$ där B är bredden hos vägg som vetter mot vibrationskällan, L är rummets djup och H är höjden. A är rummets absorptionsyta i m^2 Sabine. Beräkningarna utförs separat för horisontella och vertikala vibrationer för de tre oktavbanden 31,5, 63 och 125 Hz. Bidragen från horisontella och vertikala vibrationer summeras logaritmiskt för varje rum och A-vägning utföres, se definitioner i appendix 4.

Källarplan, $n = 0$

Stomljudsbidrag från vertikala vibrationer i grunden:

$$L_{v, \text{ver, gr}}$$

$$L_{p, \text{ver, 0}} = L_{v, \text{ver, gr}} + 10 \cdot \log\left(\frac{B \cdot L}{A}\right) + 8 \text{ dB}$$

Stomljudsbidrag från horisontella vibrationer i grunden: $L_{v, \text{hor, gr}}$

$$L_{p, \text{hor, 0}} = L_{v, \text{hor, gr}} + 10 \cdot \log\left(\frac{B \cdot (4 \cdot H + L)}{4 \cdot A}\right) \text{ dB}$$

Plan 1

Stomljudsbidrag från vertikala vibrationer i grunden:

$$L_{v, \text{ver, gr}}$$

$$L_{p, \text{ver, 1}} = L_{v, \text{ver, gr}} + 10 \cdot \log\left(\frac{B \cdot L}{A}\right) + 10 \text{ dB}$$

Stomljudsbidrag från horisontella vibrationer i grunden: $L_{v, \text{hor, gr}}$

$$L_{p, \text{hor, 1}} = L_{v, \text{hor, gr}} + 10 \cdot \log\left(\frac{B \cdot (H + L)}{4 \cdot A}\right) \text{ dB}$$

Plan 2 och vidare uppåt

Stomljudsbidrag på plan n från vertikala vibrationer i grunden: $L_{v, \text{ver, gr}}$

$$L_{p, \text{ver, n}} = L_{p, \text{ver, n-1}} - 1 \text{ dB}$$

Stomljudsbidrag på plan n från horisontella vibrationer i grunden $L_{v, \text{hor, gr}}$

6.6 MODELL FÖR VIBRATIONER INOMHUS

6.6.1 Vertikala vibrationer

Sten Ljunggren vid DNV Ingemansson AB har utvecklat nedanstående modell för beräkning av vibrationer i bjälklag.

Vid mycket låga frekvenser svänger en byggnad som en fast kropp. Vid högre frekvenser modifieras denna svängningsform på grund av resonanser i stommens olika delar. Normalt har bjälklagen de lägsta resonansfrekvenserna, eftersom bjälklagsspännvidderna brukar vara större än våningshöjden. Vid en bjälklagsresonans sker en förstärkning av markvibrationernas amplitud. Denna förstärkning är viktig, speciellt i byggnader med stora bjälklagsspännvidder.

Grundresonansfrekvensen för en fritt upplagd betongplatta beräknas med följande uttryck

$$f_{\text{res}} = 1328 \cdot h \cdot \left[\frac{1}{l_x^2} + \frac{1}{l_y^2} \right] \text{ Hz}$$

där

h är plattans tjocklek i m

l_x och l_y är plattans kantlängder i m

För en platta där l_x eller l_y är oändlig blir $f_{\text{res, fast}} = f_{\text{res}} / 2$ Hz och för en fast inspänd platta blir $f_{\text{res, fast}} = f_{\text{res}} \cdot 2$ Hz. Formlerna gäller för $E = 2 \cdot 10^{10}$ N/ m^2 och densitet 2300 kg/m^3 . Inspänningsförhållandena är inte väldefinierade i normala fall. Man bör därför använda fallet fritt upplagd platta eftersom detta ger

lägst frekvens och därmed inte underskattar resonanser som kan bli aktuella vid markvibrationer från påslagning som ofta sträcker sig upp mot 40 - 50 Hz (varierar med avståndet till pålplatsen).

Förstärkningens storlek har här beräknats på följande sätt. Frekvensen antas vara låg i den mening att vibrationernas våglängd i marken är mycket större än avståndet mellan två bärande pelare eller väggar. Detta är inget hårt krav, exempelvis är P-vågens våglängd ca 50 m vid 9 Hz. En stor våglängd medför att de båda ändarna av de aktuella elementet svänger i fas.

Överensstämmelsen mellan mätta och predikterade värden är god. Detta beror snarast på att beräkningsmodellen är enkel och så fundamental att fel knappast kan göras. Predikteringens kvalitet bestäms i praktiken i huvudsak av kvaliteten hos ingångsvärdena. Modellen ger samma vibrationer i alla bjälklag oavsett våningsplan.

Vibrationshastighetsnivån $L_{v,bjlg}$ i vertikalled mitt på en bjälklagsplatta blir

$$L_{v,bjlg} = L_{v,ver,gr} + K_{res} \text{ dB}$$

där

$L_{v,ver,gr}$ är vertikal vibrationshastighetsnivå i grunden i dB, i **tersband**
 K_{res} är förstärkning i dB av vibrationshastighetsnivå mitt på platta jämfört med kanten av plattan

$$\blacksquare f_{stör} < f_{res}$$

Vid störfrekvenser $f_{stör}$ i grunden under grundresonansfrekvensen f_{res} blir $K_{res} = 0$ dB, dvs hela bjälklaget antas svänga i fas med väggarna (stelkroppsrörelse).

$$\blacksquare f_{stör} \equiv f_{res} \text{ eller } f_{stör} \equiv 4 \sum f_{res}$$

Vid störfrekvenser $f_{stör}$ i grunden lika med första resonansfrekvensen f_{res} eller andra resonansfrekvensen $4 \cdot f_{res}$ beräknas förstärkningen K_{res} med följande uttryck

$$K_{res} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{0,72 \cdot \eta_{tot}} \right) \text{ dB}$$

där η_{tot} är bjälklagsplattans totala förlustfaktor som är en summa av inre förluster η_{inre} och randförluster η_{rand} . Obs uttrycket gäller endast för nivåer angivna i tersband.

η_{inre} kan approximeras till 0,03 om lätta regelväggar står på bjälklaget (Novak, 1993); i annat fall sätts $\eta_{inre} = 0$.

$$\eta_{rand} = \frac{L_{rand}}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot S}$$

där

L_{rand} är längd i m hos bjälklagsplattan med förluster, dvs anslutningar mot platsgjutna väggar.
 k är böjvägtalet i m^{-1} för aktuell resonansfrekvens f_{res} eller $4 \cdot f_{res}$.
 k kan beräknas ur formeln för given betongtjocklek och frekvens Hz.
 S är bjälklagsplattans yta i m^2

Ex: För en 20 cm platta med resonansfrekvens 35 Hz, $B \cdot L = 4 \cdot 4$ m, förluster längs två kanter och lätta skiljeväggar. Detta ger en förstärkning K_{res} på 11 dB av vibrationshastighetsnivån vilket motsvarar en förstärkning av vibrationshastigheten med 3,6 ggr.

6.6.2 Horisontella vibrationer

Bostadshuset enligt ovan har förutsatts vara relativt styvt och kompakt och med en lägsta resonansfrekvens vid 35 Hz. Detta medför att huset vid låga frekvenser svänger med samma svängningshastighet som marken medan hastigheten avtar med ökande frekvens på grund av kopplingen mot marken. Denna koppling är mindre effektiv i detta fall än det föregående vilket medför att frekvenserna över ca 20 Hz är av liten betydelse.

För trähus och andra hus som är relativt veka i horisontalled fås resonanser långt ner i frekvens ned till någon Hz. Vibrationerna i horisontalled kommer att förstärkas högre upp i huset. Då trähus inte är lika homogena som hus med platsgjuten betongstomme blir variationerna hos denna förstärkning mellan olika hus mycket stor. Något underlag för att uppskatta hur vibrationerna förstärks har inte framkommit ur underlaget. Man bör alltså använda sig av vibrationsmätningar i aktuella byggnader vid provpåkning och då mäta i flera punkter på olika våningsplan parallellt. Även kontorshus med pelardäcksstomme blir normalt tämligen veka i horisontell led.

6.7 STÖRNINGSMINSKANDE ÅTGÄRDER

Olika typer av åtgärder kan utföras för att minska luftljudsstörningarna från pålning/ spontning. Största svårigheten är att dessa måste vara så enkla och väl utformade att de verkligen kan användas i praktiken. De störningsminskande åtgärderna kan delas in efter fyra principer

- bullerminskning vid källan (hindra ljudets uppkomst)
- avskärmning eller inbyggnad av bullerkälla
- bullerminskning vid mottagaren
- andra åtgärder såsom begränsning av expositions-tid per dygn eller temporär flyttning av de buller-utsatta.

Målsättningen bör alltid vara att lösa ev problem med bullerminskning redan vid källan. Ett antal förslag framförl till olika typer av inbyggnader finns beskrivna i litteraturen. Utvärdering efter en längre tids användande med praktiska synpunkter från driftspersonal är dock sällsynta.

6.7.1 Bullerminskning vid källan

Vilken del av en pål- eller spontningsutrustning som svarar för största bidraget till dess totala ljudeffektnivå varierar mellan olika maskintyper. Det finns inga generella åtgärder tillämpliga på alla typer av utrustningar. Åtgärderna måste anpassas för varje maskin för att optimera drivningskapacitet, åtkomlighet och fältmässighet. Hur stor luddämpning en åtgärd ger beror på om det verkligen är den dominerande ljudalstringen som åtgärdats eller om andra delkällor kvarstår som håller upp ljudnivån när en åtgärdats. Det är alltså väsentligt att prioritera åtgärderna för att uppnå störst ljudnivåsänkning.

En sammanställning av ett antal "tystare maskiner" redovisas i (Weltman, A.J., 1980).

Slående metoder

För utrustning med någon form av hejare är de dominerande ljudalstringsmekanismerna:

- slagljud utstrålat från hejare, dyna och påle/spont
- utstrålning från gejder på grund av vibrationer från hejare och dyna
- lin- och vajerslag mot gejder
- motor- och transmissionsbuller

Åtgärder som tillämpats:

- Ickemetalliskt mellanlägg, till exempel trä, repslingor, plastskivor mellan hejare och dyna

- bättre styrning av hejarens rörelse
- dämpning av gasutsläpp på diesel- och trycklufts hejare

I Bennerhult (1983) beskrivs åtgärder på fallhejare typ Åkerman och Banut där man bedömdes kunna sänka ljudnivån 5 - 6 dBA med ändringar av dynan och dess styrning och 8 - 10 dBA med omkonstruktion av hejare + dyna. I (Banut 400) visas en konstruktion där man på en Banut 400 minimerat bullret från gejdern genom hydraulisk lyftning (istf lina) och bättre styrning av hejaren. Ljudnivån på 7 m avstånd sänktes från 95 till 90 dBA.

Ickeslående metoder

För hydraulisk utrustning typ Silent Piler och Taywood Pilemaster är kringutrustningen i form av pumpar och kompressorer de dominerande ljudkällorna. I vissa fall har eldriven kringutrustning kunnat användas vilket minskat ljudnivån väsentligt. Även för metoder där ett hål tas upp med jordbör orsakas mesta bullret av motor och transmission varför åtgärder som bättre inkapsling och luddämpare är mest aktuella.

En ny metod som utvecklats i Norge kallad ECT 913 (Fossum, H, 1993) för gjutning av pålar i friktionsmassor skall enligt tillverkaren vara betydligt tystare än vanliga metoder. Hål tas upp genom högtrycksspolning varefter igjutning sker.

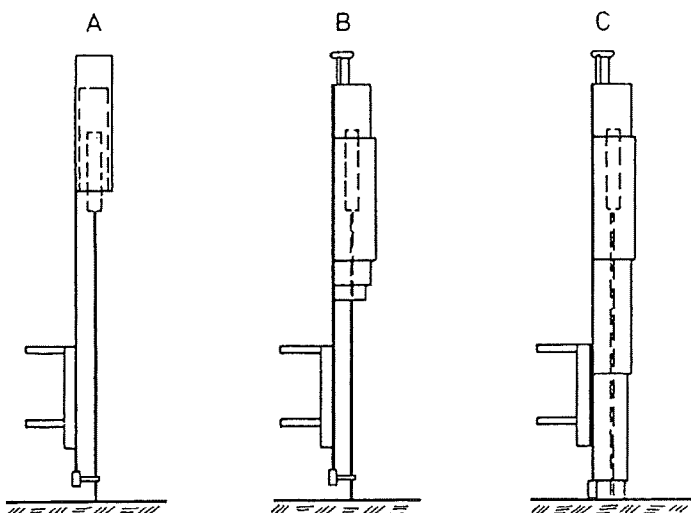
6.7.2 Avskärmning eller inbyggnad av bullerkälla

Prov har gjorts med många olika typer av inbyggnader av spont- och pålningsutrustning.

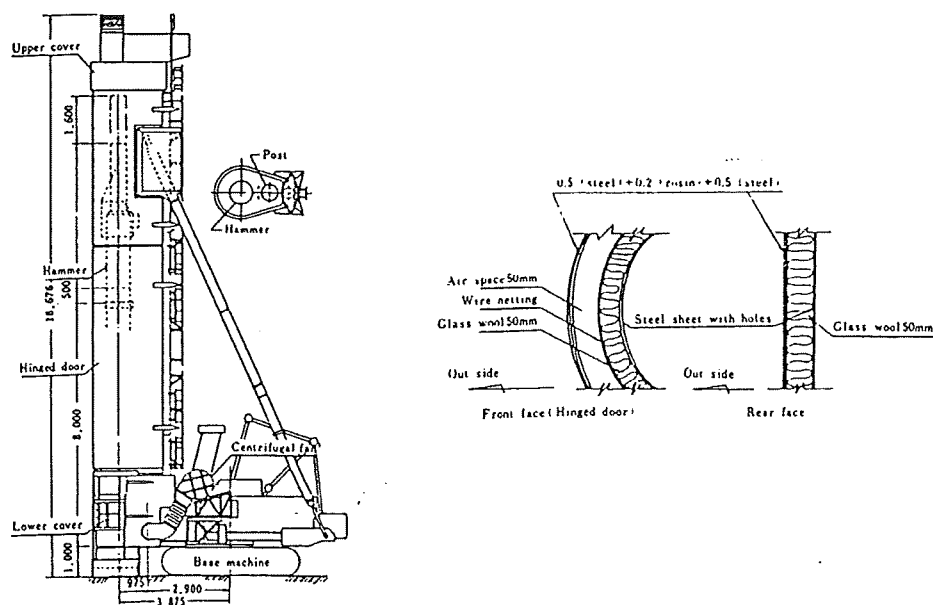
För att fungera i praktiken bör skärmen eller inbyggnaden vara fast monterad på bullerkällan samt så litet som möjligt hindra resning av ny påle. Detta har lösts genom öppningsbara inbyggnader eller partiella inbyggnader som flyttas i höjdlid allteftersom pålen drivs nedåt. Fristående skärmar är svåra att använda eftersom de måste vara stora och flyttas allteftersom pålningsplatsen ändras under arbetets gång.

I figurerna 6.8 och 6.9 visas två exempel från Bennerhult (1983) och Mugihora (1977); för det senare visas även ljudnivåsänkning (figur 6.10) vid olika frekvenser.

Enligt en tabell i Bennerhult (1983) uppnås i allmänhet ca 20 dB ljudreduktion med fast monterade inbyggnader i plåt. Med tung pressenningsduk uppnås sällan mer än ca 10 dB.

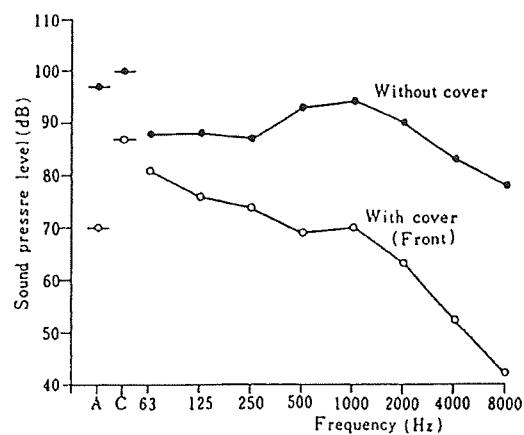


Figur 6.8. Principlösning för teleskophuv.
(Bennerhult, 1983)



Figur 6.9. Inbyggd dieselhejare, samt detalj som
visarväggkonstruktion. (Mugihora, 1977)

Figur 6.10. Ljudnivåer från dieselhejare i figur 6.3 på
30m avstånd med och utan inbyggna-
den. (Mugihora, 1977)



6.7.3 Bullerminskning vid mottagaren

Om byggarbetena ska resultera i en bestående ljudkälla (till exempel nybyggnad av väg eller järnväg) kanske man ändå måste vidta fasadisoleringsåtgärder i närbelägna bostäder etc, t ex komplettering med en extra ruta alternativt fönsterbyte. Det är då lämpligt att göra detta redan innan bygget kommer igång.

Genom tidig information till de boende ex genom möten eller skrivelser kan man dämpa farhågor för allvarliga störningar. Åtminstone följande information bör delges:

- projektets syfte
- tidplan för olika etapper som ingår
- störningar som kan förväntas på olika platser under projektets gång samt varaktighet
- som påminnelse är det lämpligt att man - innan en ny etapp som kommer att förändra störningarna påbörjas - skickar ut information om detta.

6.7.4 Andra åtgärder

Tidsbegränsning

Denna åtgärd måste utformas tillsammans med de kringboende. Är det fråga om kontor eller bostäder? När är man hemma? osv. Ofta ålägger miljöförvaltningen byggherren att inte påbörja arbetet före kl 07 på morgonen.

Flyttning av hyresgäster

under kortare eller längre tid

Om ingen andra åtgärder är tillräckliga kan tillfällig flyttning av hyresgästerna vara den enda lösningen, när t ex spontningen sker alldeles utanför fastigheten

Sänkt hyra för hyresgäst

Sänkning av hyran påverkar bullerstörda personer på två sätt; dels kan det vara lättare att stå ut med visst buller när man får ekonomisk kompensation, dels är det möjligt att med dessa pengar bo på annat håll under de mest bullriga perioderna. Detta är en åtgärd som kan tillgripas när man inte når tillräckligt långt med ljuddämpningsåtgärder.

6.7.5 Kostnader

Eventuell minskning i produktivitet och därmed kostnadsökningar orsakade av ljuddämpningsåtgärder har studerats mycket lite. Ett undantag är Kessler (1985) där man provade följande åtgärder vid drivning av stålrörspålar med en dieselhejare typ Vulcan:

- inbyggnad
- mjuka mellanlägg
- utloppsljuddämpare
- dämpmassa på pålarna

Kessler redovisar kostnadsökningar på grund av förlängd arbetstid samt hur tiden för drivning av en påle påverkades av åtgärderna. Det var framförallt applicerandet av dämpmassa på pålarna som ökade arbetstiden.

6.8 MODELL FÖR BULLER

Här sammanfattas beräkningsmetodiken för buller från pålning och spontning.

6.8.1 Förenklad metod för buller ute och inne

Modellen används för en första grov kontroll av för att se om ytterligare beräkningar är befogade.

- Ljudnivå utomhus, frifältsvärde,

$$L_{A,eq,ute} = L_w - A_{avst} - A_{skärm} - A_{tid} \text{ dBA}$$

- Ljudnivå i öppet fönster,

$$L_{A,eq,fönster} = L_{A,eq,ute} + 1 \text{ dBA}$$

- Ljudnivå inomhus,

$$L_{A,eq,inne} = L_{A,eq,ute} - 25 \text{ dBA}$$

där

L_w är källans ljudeffekt som hämtas ur källadatatabell, se 6.2, eller mäts vid provpålning, Appendix 2.

A_{avst} är avståndsdämpning som beräknas med uttrycket nedan hämtat från 6.3.1

$$A_{avst} = C_{avt} \cdot \log d + 8 \text{ dB}$$

Där d är avstånd till ljudkällan i m.

C_{avt} är en faktor som antar följande värden

Ljudutbredningsförhållande	C_{avt}
- Frifält utan reflekterande ytor i närheten, för definition se avsnitt Reflekterande ytor.	20
- Normal stadsbebyggelse	17
- Smal gata (6 m)	13

$A_{skärm}$ är ev. skärmdämpning som beräknas med metoden under 6.3.6.

A_{tid} är en tidskorrektion för att få ekvivalentnivå för

aktuell tidsperiod ex en arbetsdag. Beräknas med uttrycket nedan baserat på tid %, som anger effektiv påldrivningstid i % av arbetsdag. Hämtas ur källdata-tabell, se Appendix 2, eller mäts vid provpålning

$$A_{tid} = 10 \cdot \log\left(\frac{100}{tid\%}\right) \text{ dB}$$

6.8.2 Fullständig metod för buller utomhus

Ekvivalenta ljudnivån utomhus $L_{A,eq,ute}$ i dBA frifältsvärde resp. i öppet fönster $L_{A,eq,fönster}$ beräknas med följande uttryck

$$L_{A,eq,ute} = L_w - A_{avst} - A_{rikt} - A_{atm} - A_{mark} - A_{refl} - A_{skärm} - A_{övrig} - A_{tid} \text{ dBA}$$

$$L_{A,eq,fönster} = L_{A,eq,ute} + I \text{ dBA}$$

där

- L_w är källans ljudeffekt se 6.2.2
- A_{avst} är avståndsdämpning se 6.3.1
- A_{rikt} är riktningsverkan se 6.3.2
- A_{atm} är atmosfärsdämpning (luftabsorption), se 6.3.3
- A_{mark} är markdämpning se 6.3.4
- A_{refl} är korrekationer för reflekterande ytor, se 6.3.5
- $A_{skärm}$ är skärmdämpning se 6.3.6
- $A_{övrigt}$ är dämpning på grund av andra faktorer, vegetation, bebyggelse etc 6.3.7
- A_{tid} är en tidskorrektion för att få ekvivalentnivå se 6.8.1

6.8.3 Fullständig metod för buller inomhus

Utifrån frifältsvärdet av ljudnivån utomhus $L_{A,eq,ute}$ beräknas ljudnivån inomhus $L_{A,eq,inne}$ med hjälp av följande uttryck

$$L_{A,eq,inne} = [L_{A,eq,ute} - K_{fasad}] \left(\log_+ \right)^* [L_{A,eq,inne,stom} - A_{tid}] \text{ dBA}$$

där

- $L_{A,eq,ute}$ är ekvivalenta ljudnivåns frifältsvärde i dBA enligt avsnitt 6.8.2
- K_{fasad} är korrektion för fasadisolering i dB enligt 6.4.4
- $L_{A,eq,inne,stom}$ är stomljuds-nivån inomhus enligt 6.5.3
- A_{tid} är en tidskorrektion för att få ekvivalent nivå, se avsnitt 6.8.1

* Med $\left(\log_+ \right)$ avses logaritmisk addition enligt figur A4.2 i Appendix 4.

Referenser

- Aas, G. (1975).** Skred som følge av peleramming i bløt leire. Nordisk Geoteknikermøde i København. NGM -75, Polyteknisk Forlag, ISBN 87-502-03983.
- Ahlberg, R. & Persson, B. (1987).** Friktionsjords packningsbenågenhet. Examensarbete. Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.
- Andersson, H. & Olsson, C. (1991).** Sättningsuppföljning i samband med grundförstärkning - Erfarenheter från Gamla Stan i Stockholm. Byggforskningsrådet, R39:1991, Stockholm.
- Andréasson, B. (1979).** Deformation characteristics of soft, high-plastic clays under dynamic loading conditions. Department of Geotechnical Engineering, Chalmers university of Technology, doktorsavhandling, Göteborg.
- Ang, A. & Tang, W. (1984).** Probability concepts in engineering planning and design, volume 2. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Arbetskyddsstyrelsens Författningssamling AFS 1992:10, 1992, Buller.**
- Avermalm, L., Callne, H. & Eriksson, H. (1993).** Djuppackning med vibrowing- fältförsök. Master Thesis. Royal Institute of Technology, Stockholm
- Bengtsson, P-E. & Ekdahl U. (1989).** Prognos av rörelser i jord och grundkonstruktion. SGF-Grundläggningsdag 1989, Stockholm.
- Benjegård, S-O (1987).** Naturvårdsverket Rapport 3300, Fasadisolering mot trafikbuller.
- Bennerhult, O. Bergdahl, U. (1983).** Buller vid pål- och spontslagning. IVA Pålkommissionen, Rapport 70.
- Berggren B., Fallsvik J., Hintze S. & Stille H. (1991).** LerslänTERS stabilitetsförhållanden-Riskvärdering och beslutsteori. SGI Varia 333, Swedish Geotechnical Institut, Linköping.
- Berglund U., Goldstein M. & Lindvall T. (1981).** Acoustical Society of America Loudness (or annoyance) summation of combined community noises.
- Bjerin, L., Ekström, A. & Eriksson, B. (1988).** Djuppackning med vibrowing metoden- resultat av fältförsök. Nordiska Geoteknikermötet. NGM 88. Oslo.
- Boyle, Su (1990).** Ground engineering. The effects of piling operations in the vicinity of computing systems.
- Bozozuk, M., Fellenius, B. H. och Samson, L. (1978).** Soil disturbance from pile driving in sensitive clay. Canadian Geotechnical Journal, vol. 15, nr. 3, sid 346-361.
- Bredenberg, H., Olsson, L. & Stille, H. (1981).** Övervakning av grundläggningsarbeten i tätort. STU, report no. 251-1981, Stockholm.
- Brenner, R. P. & Viranuvut, S. (1977),** Measurement and Prediction of Vibrations Generated by Drop Hammer, Piling in Bangkok Subsoils. 5th Southeast Asian Conference on Soil Engineering, Bangkok, Thailand, s. 105 - 119.
- Brink, R. 1980.** Skador i byggskedet. Byggforskningsrådet, R75:1980, Stockholm.
- British Standards Institution (BSI), BS5228: Part 4 (1992),** Code of practice for noise and vibration control applicable to piling.
- British Standards Institution (BSI), BS6472 (1984).** Guide to the evaluation of human exposure to vibrations in buildings.
- British Standards 5228, (1992).** Noise control on construction and open sites, Part 4. Code of practice for noise and vibration control applicable to piling operations.
- Broms, B. B. (1976).** Jordmekanik del II. Department of Soil and Rock mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm.

- Buijs J.H.N. (1991).** The Susceptibility of Computers to Vibration Journal of Low Frequency Noise and Vibration Vol. 11 No. 1.
- Buller från byggplatser, 1975,** Naturvårdsverket Publikationer 1975:5, Socialstyrelsen Råd och anvisningar nr 50.
- (Die) Bundes- und Landesvorschriften zum Schutz gegen Baulärm 1971.** Carl Heymanns Verlag KG, (1971). Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Schutz gegen Baulärm. Geräuschimmissionen.
- (Die) Bundes- und Landesvorschriften zum Schutz gegen Baulärm 1976.** Carl Heymanns Verlag KG, (1976). Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Schutz gegen Baulärm. Emissionsmessverfahren .
- Byggregler (1994).** BBR 94. Boverket, Karlskrona.
- Cremer, L. & Heckl, M (1967).** Körperschall. Springer, s. 363. Berlin.
- Crooks J.H.A., Matyas, E.L. & McKay, H.M. (1980).** Excavation slope stability related to pore-water pressure variations during piling. Canadian Geotechnical Journal, vol. 17, nr 2, pp 225-235.
- D'Appolonia, E., Miller, C.E. & Ware, T.M. (1953).** Sand compaction by vibroflotation, ASCE Proc. Vol 79 (1953) no 200.
- Davidson J.L., Mortensen R. & Barreiro D. (1981).** Deformations in sand around a cone penetrometer tip. Proc. 10th. ICSMFE, Stockholm. pp. 467-470.
- Deiese Donald A. & Kessler M, (1981).** Air Pollution Control Association Pile Driving Noise Control.
- DIN 4150 (1975).** Erschütterungen im Bauwesen; Teil 1 - Grundsätze, Vorermittlungen und Messung von Schwingungsgrößen; Teil 2 - Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden. (1992); Teil 3 - Einwirkungen auf bauliche Anlagen. Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin 30.
- Dobrie et al. (1976).** Simplified Procedure for Estimating the Fundamental Period of a Soil Profile. Bulletin, Seismological Society of America, Vol. 66, No. 4.
- Dugan, J. P. & Freed, D. L. (1984).** Ground heave due to pile driving. International conference on case histories in geotechnical engineering, MO. Proc. vol. 1, sid. 177-122. St Louis.
- Ekström, J. (1989).** A field study of model pile group behaviour in non-cohesive soils - Influence of compaction due to pile driving. Ph.D. Thesis. Chalmers University of Technology, Gothenburg
- Engwall, L. & Holm, G. (1984).** Grundläggningsarbete i tätort. Erfarenheter från praktikfall med spontning och pålning. Nordiska Geoteknikermötet, NGM-84, Linköping. Proceedings, vol. 1, pp 77-86.
- Environmental Health Act, (1990).** Ministry of the Environment, Republic of Singapore, Letter (Koh Geok Beng).
- Eriksson, H., Hintze, S., Janson, T. & Wahlström, L. (1992).** Ölbryggeri lyftes av magmedicin och pålar. Bygg & Teknik, no 8. pp. 26-30. Stockholm.
- Falch, E. (1984).** Noise from Construction sites, a prediction method. Kilde, Rapport 49a.
- Fellenius, B. (1955).** Resultat från pålprovningar vid Göteborg C. Pålkommissionen, särtryck Nr. 5.
- Flaate, K. (1972).** Effects of pile driving in clay. Canadian Geotechnical Journal, vol. 9, nr. 1, sid 81-88.
- Fossum, H (1993).** Endelig - trippelriggen er klar, Anleggsmaskinen 7-8/93.
- Giacomelli, C. (1986).** Vibrationsstörningar i bostäder. En Litt.studie om gränsvärden och mätmetoder. SP. Akustik Teknisk Rapport SP-RAPP 1986:31.
- Gill H.S. (1979).** Assessment of noise from "Quiet" pile drivers ISVR University of Southampton, Journal of sound and vibration No 2, p 193-202.
- Greenwood, D.A & Farmer, IW. (1971).** Discussions. Effect of foundation construction on nearby structures, 4th Pan Am CSMFE, vol 3. San Juan.
- Grose W.J. (1986).** Driving piles adjacent to vibration-sensitive structures - a case history, Ground Engineering p 23-24, 28, 31.
- Hagerty, D.J. (1975).** World Construction, Controlling noise from piledriver.
- Handboken Bygg del G (1984).** LiberFörlag, ISBN 91-38-06077-9. Stockholm.
- Hansbo, S. (1990).** Jordmekanik 1, Spänningar av yttre last, sättningar, jordtryck. Chalmers tekniska högskola.
- Harjodh S. Gill, (1982).** Noise Control Engineering Journal, Control of Impact Pile Driving Noise and Study of Alternative Techniques.

- Head, J.M. & Jardine, F.M. (1992). Ground-borne vibrations arising from piling. Techn. Note 142, Construction industry research and information, London.
- Heckman, W. S. & Hagerty, D. J. (1978). Vibrations Associated with Pile Driving. ASCE Journal of the Construction Division, Vol. 104, No. CO4, s. 385 - 394.
- Helenelund, K.V. (1977). Methods for reducing undrained shear strength of soft clay. Swedish Geotechnical Institute, Report no. 3, Linköping.
- Hellman L. (1983). Pålningsteknik i stadsförnyelse. Byggmästaren no 6, pp.19-21. Stockholm.
- Hellman, L. et al (1985). Stadsförnyelse på bättre grund - Resultat av metod- och produktutveckling. STU, report no. 486-1985, Stockholm.
- Hintze, S. (1991). Prognos, övervakning och styrning av rörelser i jord. Bygg & Teknik no. 8, pp. 21-25. Stockholm.
- Hintze, S. (1994). Risk Analysis in Foundation Engineering with Application to piling in Loose Friction Soils in Urban Situations. Doctor Thesis. Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Hintze, S., Rehnman, S-E. & Stille, H. (1989). Konsekvenser av rörelser i jord. V-byggaren no. 4, pp. 20-23. Stockholm.
- Holmberg, R. et al (1984). Vibrations generated by traffic and building construction activities. Byggforskningsrådet, D15:1984, Stockholm.
- Holmberg, R. (Editor) (1982). Vibrationer i samband med trafik och byggverksamhet, Informationsskrift från IVAs Kommitté för vibrationsfrågor. Byggforskningen. T-skrift T43. Stockholm.
- Hough, B.K. (1957). Basic soils Engineering. The Royal Press Comp. New York.
- Janson, T. & Nissling H. (1992). Riskvärdering vid grundläggningsarbeten i tät stadskärna. Master Thesis. Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Kessler F.M & Schomer P.D. (1980). Pile Driver Noise Control. Procc. Inter-Noise 80, p 321.
- Kessler F.M & Frederick M. (1985). Cost Assessment of Construction Noise Control.
- Kirkebø, S. (1989). Rambarhet og poretrykksoppbygging ved ramming av pæler. Norges Tekniske Høgskole. Stiftelsen for Industriell og Teknisk Forskning. SINTEF Rapport STF 69 A89002.
- Kramer, H. & Richwien, W. (1980). Problems in construction of dams with uniform sands. International conference on compaction, Paris. Vol. 1 s 252-256.
- Lacy, H.S. & Gould, J.P. (1985). Settlement from pile driving in sands. Proc. Sym. Vibr. Probs in Geotech Engng, Detroit Michigan.
- Lambe, T.W. & Whitman, R.V. (1979). Soil Mechanics. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Land, P. (1990). Spontmaskiners inverkan på omgivande miljö, SBUF-Projekt
- Larsson, R. & Mulabdic, M. (1991). Shear moduli in scandinavian clays, Statens geotekniska institut, Rapport 40, Linköping.
- Larsson, R. (1977). Basic behaviour of scandinavian soft clays. Statens geotekniska institut, Rapport 4, Linköping.
- Lindberg, G. (1990). Vågutbredning i jord - analys och åtgärder - vibrationer från tågtrafik. Inst. för jord och bergmekanik KTH, BFR 870240-4. Stockholm.
- Ljunggren, S. (1992). The importance of in-plane waves for the transmission of noise in buildings above railways. ICA conference, Beijing.
- Ljunggren, S. (1993). Airborne sound insulation of thin plates. Journal of the Acoustical Society of America.
- Ljunggren, S (1990). Vesterbro Baneby, Bedömning, av stomburet buller och vibrationer från tågtrafik. Köpenhamn.
- Lo, K. Y. & Stermac A. G. (1965). Induced pore pressures during pile-driving operations. Proceedings of the Sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 2, sid. 285-289. Toronto.
- Lo, K. Y. (1968). Discussion of: Effects of pile driving on soil properties, by Orrje and Broms. J. Soil Mechanics and Foundation Division ASCE, SM2, sid. 606-607.
- Long, P. D. (1989). Effects of Vibrations from Pile driving on Surrounding Ground and Structures. Statens geotekniska institut, Varia 251, 186 s.
- Martin, D. J. (1980). Ground Vibrations from Impact Pile Driving during Road Construction. TRRL Supplementary Report 544, 16 s.

- Massarsch, K. R. (1993).** Man-made Vibrations and Solutions. State-of-the-Art Lecture, Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Missouri, June 1 - 6, 1993, Vol. II, pp. 1393 - 1405. St. Louis.
- Massarsch, K. R. (1992).** Static and Dynamic Soil Displacements Caused by Pile Driving. Keynote Lecture, Proceedings, 4th International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles, s. 77 - 84. Hague.
- Massarsch, K. R. (1991).** Seminarium Skador från markvibrationer och möjliga isoleringsåtgärder. Inst. för jord och bergmekanik KTH, Rapport 26. Stockholm.
- Massarsch, K. R. (1985).** Stress-strain behaviour of clays. Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 2, s. 571-574. San Francisco.
- Massarsch, K. R. (1984).** Vibrationer i jord och berg. Handboken Bygg, Geoteknik Kapitel G20. Liber-Förlag. s. 517 - 525. Stockholm.
- Massarsch, K. R. (1976).** Soil movements caused by pile driving in clay. Ingenjörsvetenskapsakademien, Pålkommisionen, Rapport 51, doktorsavhandling. Stockholm.
- Massarsch, K. R. & Broms, B. B. (1991).** Damage Criteria for Small Amplitude Ground Vibrations. Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, March 11 - 15, 1991, s. 1451 - 1459. St. Louis.
- Massarsch, K. R. & Broms, B. B. (1981).** Pile driving in clay slopes. Proceedings of the Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 3, sid. 469-474. Stockholm.
- Massarsch, K. R. & Drnevich, V. P. (1979).** Deformation properties of normally consolidated clays. Proc. 7th European Conf on Soil mechanics and Found. Eng., Vol 2, pp 251-255.
- Mattson, B., Wahlström, L. & Zackrisson P. (1988).** Skadepåverkan vid grundförstärkningsarbeten. SBUF. Stockholm
- Meyerhof, G. G. (1959).** Compaction of sands and bearing capacity of piles. Proc. ASCE, vol. 85, no SM6, pp 1-29.
- Michell, J. K. (1981).** Soil improvement - state of the art report. 10th ICSMFE. Stockholm.
- Miljöstyrelsen (1984).** Ekstern stöj fra virksomheder, Vejledning nr 5, Köpenhamn.
- Mugihora, K. & Hasada, M. (1977).** Study on pile driving noise control by enclosing diesel pile hammer planning and operation of practical apparatus. Kajiwa institute of construction technology. Tokyo.
- Mölleryd, B. et al. (1991).** Rätt, hög kvalitet i byggandet. Royal Swedish Academy of Engineering Sciences, ISBN 91-7082-518-1, Stockholm.
- Nilsson, G. (1989).** Markvibrationer vid påslagning. Examensarbete, Nr. 3:89. Jord och bergmekanik, KTH, 43 s. Stockholm.
- Nishida, Y. (1963).** A basic calculation on the failure zone and the initial pore pressure around a driven pile in clay. Proc. 2. Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. vol. 1, sid. 217-219.
- Nord, B. & Stille, H. (1982).** Grundläggning inom tids och kostnadsramar. V-byggaren Nr. 7-8, Stockholm.
- Nord, B., Olsson, L. & Stille, H. (1979).** Grundläggning i tätort. STU, report no. 152-1979, Stockholm.
- Novak, (1993).** The influence of partitions on the loss factor of concrete floors in multistorey buildings. Appl. Acoustics Vol 89, 1993 sid 253-264.
- Nybyggnadsregler (1988).** BFS 1988:18. Boverket, ISBN 91-38-09758-3, Stockholm.
- Nyt fra Miljöstyrelsen (1983).** Retningslinier for måling og vurdering af vibrationer i det eksterne miljø, 2/1983, Köpenhamn.
- Odebrant, T. (1986).** Helsingborg tågtunnel. Vibrationer från tågtrafik.
- Odebrant, T. (1987).** Helsingborg tågtunnel. Buller och vibrationer från byggtreprenaden.
- Ohlsson, F., Hallingberg, A., Johansson, L. & Nyberg, M. (1994).** Övervakningssystem för lerslänter - Beskrivning av förekommande instrument och metoder, Skredkommisionen, Rapport 2:94, Linköping.
- Olsson, C. & Holm G. (1993).** Pågrundläggning. Svensk Byggtjänst, ISBN 91-7332-663-1. Stockholm.
- Olsson, L & Stille, H. (1984).** Partialkoefficientmetoden i geotekniken - Teoretisk grund 2. Byggforskningsrådet, R52:1984, Stockholm.

- Oslo helseråd (1973).** Foreskrifter om begrensnings av støy. Oslo.
- Pagold, C. (1991).** Kontrollmätning av buller från pålning i vatten.
- Parvin & Norchi, (1983).** Byggnadsvibrationer orsakade av grundarbete och trafik., Forskningsstiftelsen för Samhällsplanering, Byggnadsplanering och Projektering. Rapport 5.83.
- Peck, R.B. (1969).** Advantage and Limitations of Observal method in applied Soil Mechanics. *Geotechnique* 1969 no 2. pp. 171-189
- Peck, R.B., Hanson, W.E. & Thornburn, T.H. (1974).** Foundation Engineering. John Wiley and Sons, New York.
- Platema, I.G & Nolet, C.A. (1957).** Influence of pile driving on the sounding resistance in deep sand layer. *Proc. 4th ICSMFE*, Vol 2. pp.52-55. London.
- Rapport nr 3. N.T.N.F, 1976,** Begrensning av støy fra bygge- og anleggningsvirksomhet, Entreprenørernes landsammanslutning, Norge. Projeckt B 1066-5468. P23-30, Appendix A.
- Robertson, P. K., Woeller, D. J. & Gillespie, D. (1990).** Evaluation of excess pore pressures and drainage conditions around driven piles using the cone penetration test with pore pressure measurements. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 27, nr. 2, 249-254.
- Robinsky, E.I. & Morrisson, C.F. (1964).** Sand displacement and compacting around model friction piles. *Canadian Geotech. Jour.*, vol. I, no. 2, pp. 81-93.
- Rosenberg, T. (Ed) (1989).** Att skydda och rädda liv, egendom och miljö. Handbok i kommunal riskanalys inom räddningstjänsten. Räddningsverket, Karlstad.
- Rowe, W.D. (1977).** An anatomy of risk. John Wiley & Sons, New York.
- Roy, M., Blanchet, R., Tavenas, F. & La Rochelle, P. (1981).** Behaviour of a sensitive clay during pile driving. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 18, nr. 1.
- Sahlström, P.O. & Stille, H. (1979).** Förankrade sponter. Byggeforskningen. Skrift T30. Stockholm.
- San Francisco (1972).** Noise Ordinance no. 274-72.
- Sarsby, R.W. (1982).** Inst. of civil eng. proc. Noise from sheet-piling operations. Denton Relief Road.
- SBN (1980).** Swedish Building Code. PFS 1980:1, ISBN 91-38-05209-1. Liber Förlag, Stockholm.
- SGF Laboratorieanvisningar del 7.** Linköping.
- Sjöberg L. (1978).** Beslutsfattande - Psykologiska studier av valsituationer. Engvall & Krantz Grafiska AB, ISBN 91-2700828-2, Stockholm.
- Skempton, A.W. & MacDonald, D.H. (1956).** The allowable settlement of buildings. *Proc. Inst. Civil. Engr. (5)*, Part III, London.
- Skredkommissionen (1995).** Anvisningar för släntstabilitetsutredningar, Ingenjörsvetenskapsakademien. Pappot 3:95. Linköping.
- SN 640 312, (1979).** Erschütterungswirkungen auf Bauwerke. Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, Schweizerische Normenvereinigung SNV, Zürich, 7 s.
- Sowers, G.F. (1993).** Human factors in civil and geotechnical engineering failures. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 119, no. 2. pp. 238-256.
- SS-ISO 2631 (1982).** Vibration och stöt. Vägledning för bedömning av helkroppsvibrationers inverkan på människan.
- SS-ISO 2631-3 (1985).** Vibration och stöt - Inverkan på människan av vertikalhelkroppsvibrationer i z-riktningen inom frekvensområdet 0.1 - 0.63 Hz.
- SS-ISO 4866, (1991).** Vibration och stöt - Byggnadsvibrationer. Vägledning för mätning av vibrationer och bedömning av dess effekt på byggnader (1-80 Hz).
- Statens offentliga utredningar (SOU 1993:65).** Miljö- och naturresursdepartementet: Handlingsplan mot buller.
- Statsrådet (1992).** Beslut om riktvärden för bullernivå, 1992, 993/92, Helsingfors.
- Studer, J. & Suesstrunk, A. (1981).** Swiss standard for vibrational damage to buildings. *Proc. 10th ICSMFE*, Vol. 3, Stockholm. pp. 307-312.
- Svensk standard (1992).** SS 460 48 61- Vibration och stöt - Mätning och bedömning av komfortstörningar i byggnader.
- Svensk Standard (1994).** SS 4604866-Vibration och stöt.
- Sällfors, G. (1984).** Handbok för beräkning av slänters stabilitet. Byggeforskningsrådet, Rapport R53:1984. Stockholm.

- Technical Memorandum on noise from Percussive Piling (1991).** Environmental Protection Department, Hong Kong.
- Terzaghi, K. & Peck R. B. (1967).** Soil Mechanics in Engineering Practice. 2nd edition. John Wiley and Sons, New York.
- Thorburn, S. & Huchinson, J.F. (1985).** Underpinning. Surrey University Press, ISBN 0-903384, Glasgow.
- Thorburn, S. et al. (1989).** Soil-Structure interaction - The real behaviour of structures. Inst. of Structural Engineers, Surrey University Press, Glasgow.
- Tomlinson, M.J. (1986).** Foundation design and construction. John Wiley and Sons, New York.
- Torstensson, B. A. (1973).** Kohesionspålar i lös lera. Institutionen för geoteknik med grundläggning, Chalmers tekniska högskola, doktorsavhandling. Göteborg.
- Tremblay, M. (1990).** Mätning av grundvattennivå och portryck, Vägverket - VBg, Statens geotekniska institut, Information 11. Linköping.
- VDI 3723 Bl 2 E. (1989).** Kennzeichnung von Geräuschmissionen; Erläuterung von Begriffen zur Beurteilung von Arbeitslärm in der Nachbarschaft.
- Vesic, A. S. (1972).** Expansion of cavities in infinite soil mass. J. Soil Mechanics and Foundation Division ASCE. SM3, sid. 265-290.
- Weltman, A.J. (1980).** PSA Property Services Agency. Noise and vibration from piling operations.
- West A.S. B.Sc., F.I.C.E. (1981).** Highways & Public Works Piling Techniques.
- World Construction, 9999,** Modern Foundations Piling technology: progress under pressure.
- Åhnberg, H. (1991).** Sättningar vid pålning i friktionsjord - Litteraturstudium. Byggforskningsrådet, Project no 860456-7, Linköping.

Appendix

Följande exempel är avsedda att beskriva omgivningspåverkan vid pålning och spontning. Exempel A belyser omgivningspåverkan vid lera och silt, exempel B vid friktionsjord, exempel C för vibrationstransport och exempel D för buller.

Appendix I **OMGIVNINGSPÅVERKAN** **VID PÅLNING OCH SPONTNING**

EXEMPEL A: **Omgivningspåverkan vid spont** **och pålslagning i lera och silt**

Syftet med denna fallstudie är att helt kort beskriva hur man kan gå tillväga vid arbete med prognostisering av omgivningspåverkan på grund av spont och pålslagning i lera och silt. Studien går inte in på egentliga beräkningar utan beskriver ett förslag till en generell arbetsfilosofi.

Problembeskrivning

En ny industribyggnad skall byggas invid Öringån. Byggnaden skall grundläggas på stödpålar. Undergrunden består huvudsakligen av en mellansensitiv lös till halvfast siltig lera. Grundundersökningen vilken utfördes i samband med projekteringen har dock visat på förekomsten av silt- och sandskikt.

Fältundersökningen bestod i totaltryckssondering, CPT-sondering, störd- respektive ostörd provtagning, porttrycksmätning på tre nivåer samt avvägning av sonderingspunkterna och släntområdet ner mot ån. I laboratoriet har rutinanalyser och CRS-ödometerförsök utförts.

En stabilitetsanalys för området tyder på att sannolikheten för brott är tillfredsställande. Dock blir säkerhetsfaktorn för dränerat brott otillfredsställande om porttrycket tillåts stiga avsevärt utöver rådande trycknivåer.

Ansvarig geotekniker ställer sig följande frågor

inför den planerade pålslagningen:

1. *Hur stora porvattentryck kan man förvänta sig på grund av pålslagningen?*
2. *Vilken geometrisk spridning har de genererade porvattentrycken?*
3. *Hur snabbt rekonsoliderar porövertrycken?*
4. *Hur påverkar jordundandrängningen stabiliteten i området?*
5. *Vilka omgivningspåverkansreducerande metoder bör vidtas?*
6. *Hur bör pålslagningen planeras avseende slagordning, hejare m m.?*
7. *Hur bör kontrollen under byggtiden utföras?*
8. *Vilken uppföljning av eventuella omgivningspåverkans effekter bör göras fram till slutbesiktningen?*

I det följande ges förslag till svar på de ovan angivna frågorna.

Svar 1.

De förväntade porvattenövertrycken prognostiseras approximativt med hjälp av den analytiska metoden beskriven i ekv. (4.3) och Figur 4.2 samt genom att studera de vid CPT-sonderingen erhållna porvattenövertrycken. Resultaten från de olika metoderna jämförs inbördes. Beräkningar utförs för hur dessa porvattenövertryck påverkar stabiliteten ner mot Öringån.

Svar 2.

Då de analytiska samt empiriska metoderna inte ger en uppfattning om den geometriska spridningen av de genererade porvattentrycken kan detta studeras i samband med en provpålning och/eller under inledningen av pålningsarbetet. Möjligen kan man approximativt uppskatta spridningen genom god kunskap om lagerföljden och ingående silt och sandskiktets relativa permeabilitet. Denna kunskap kan endast fås med hjälp av flera CPT-sonderingar.

Svar 3.

En uppfattning om rekonsolideringstiden för de genererade portrycken kan fås genom utjämningsförsök under CPT-sonderingen och med hjälp av ekv. (4.13). Bäst är dock att under en provpålning mäta erhållna porvattentryck och dess avklingningstider i strategiskt valda mätpunkter och på lämpliga nivåer. Portrycken bör även följas upp under själva produktionspålningen, detta ger en möjlighet till ett aktivt designtänkande.

Svar 4.

Hänsyn till ökade aktivtryck till följd av jordundantäckningen i det släntnära området bör tas. Vid stabilitetsberäkningarna kan ett jordtryck adderas till de pådrivande krafterna enligt Figur 4.5.

Svar 5.

Reduktion av genererade portryck kan erhållas på ett flertal sätt. I detta fall kan det vara lämpligt att till exempel dra lerproppar (dock ej djupare än det kritiska djupet enligt ekv. (4.16)). Proppdragningen kan kompletteras med att man sätter dräner på pålarna. Ett alternativ till proppdragning kan vara att arbeta med pålar med liten tvärsnittsarea såsom stålplålar (typ X-plålar). Förborring genom fyllning och fasta torrskorpor kan vara aktuell.

Påverkansreducerande metoder kan väljas från kap. 4.6.

Svar 6

Slagordningen bör vara sådan att jordundantäckningen huvudsakligen styrs i en för stabiliteten och närliggande konstruktioner lämplig riktning, dvs bort från slänten och känsliga konstruktioner. Eventuellt bör pålningen initieellt påbörjas med ett glest mönster i det omedelbara släntområdet.

Genomförs en provpålning med för hejaren olika fallhöjder kan hejare och rekommenderad fallhöjd föreskrivas för reduktion av genererade porvattentryck.

Svar 7.

Hur kontrollen under byggtiden skall genomföras bör regleras i ett till bygghandlingen särskilt dokument innehållande en övervakningsplan och en åtgärdsplan.

Arbetet bör föregås av en sprickbesiktning.

Portryck bör mätas i eventuella skikt samt eventuellt även på någon nivå i den homogena leran.

Deformationerna i släntområdet bör åtminstone kontrolleras med hjälp av noggrant uppmätta siktlinjer samt avvägning av ytligt satta peglar. För att få en uppfattning om deformationerna mot djupet bör dock helst inklinometermätningar göras i någon eller några punkter.

Mätningarna bör göras dels under pålningsarbetet samt vid paus i arbetet och efter detsamma.

Viktigt är att lägga märke till eventuella rörelser efter det att arbetet avstannat. Då bör man omedelbart tänka över lämpliga åtgärder för att säkra slänten och minska risken för fortsatta rörelser.

Mätningarna bör i regel genomföras oftare under inledningen av påslagningsarbetena.

Svar 8.

Mätningar som utfördes under byggskedet bör följas upp med ytterligare någon mätning i samband med slutbesiktningen.

En efterbesiktning avseende sprickbesiktningen bör utföras efter påslagningen eller eventuellt i samband med slutbesiktningen beroende vilken entreprenadform som valts.

EXEMPEL B:

Omgivningspåverkan vid spont och påslagning i friktionsjord

Syftet med detta exempel är att kort beskriva hur man kan gå tillväga vid arbete med pål/spontslagning i friktionsjord. Exemplet går inte in på beräkningar utan beskriver ett förslag till en generell arbetsfilosofi.

Problembeskrivning

Grundläggningen av en ny byggnad vid en tunnelbanestation innebar att schaktning måste utföras nära en tunnelbanebank av friktionsjord. Schaktdjupet var som mest 8 meter och avståndet från spontning till tunnelbaneräls var 3,5 m. På grund av närheten till tunnelbanan fick inga stora rörelser ske i slänten och beställaren ställde extra höga krav på att omgivningspåverkan skulle bli liten med tanke på de konsekvenser som ett stopp i tunnelbanan skulle innebära. Kravet på maximal rörelseskillnad mellan två närliggande räler i spåren sattes till fem millimeter. Detta är ett mycket strängt krav att uppfylla och som kräver en skonsam arbetsmetod, en noggrann prognos av förväntade rörelser samt ett omfattande övervakningssystem.

Schakten kunde stabiliseras med i stort sätt två olika metoder:

1. Stabilisering av schakten genom slagning, alternativt borring, av en konventionell berlinerspont med bakåtförankrade förspända stag.
2. Som en brant, armerad, betongsprutad slänt med bakåtförankrade förspända stag.

Byggherren och huvudentreprenören framförde önskemål om att arbetet skulle utföras på kort tid. Detta skulle möjliggöra en tidigare igångsättning av husentreprenaden och minska totala byggtiden.

Valet blev att stabilisera schakten mot tunnelbanan med slänt. Anledningen var främst möjligheten att kunna genomföra arbetet på kortare tid. Dessutom inverkade den osäkerhet som rådde beträffande fyllningen i banken som delvis kunde innehålla svårforcerbara bergblock.

Grundläggningstekniska förutsättningar

De tidiga geotekniska undersökningarna visade att berget överlagrades av morän med en varierande mäktighet. Ovanpå moränen konstaterades lös till halvfast lera med en maximal mäktighet av ca 12 meter. Närmast markytan och ca två meter ned konstaterades blockig och stenig fyllning som bestod av löst till fast lagrad friktionsjord.

Ansvarig geotekniker ställde sig inför följande frågor:

1. Hur stor rörelse i tunnelbanebanken kan man förvänta sig från spontslagningen?
2. Kommer schaktbotten att häva sig?
3. Kommer stabiliteten att påverkas i området?
4. Vilka omgivningsreducerande åtgärder kan och bör man vidtaga?
5. Hur bör man kontrollera rörelserna?
6. Bör man ha ett larmsystem och hur ska då denna vara utformad?

Slänten utfördes i en lutning av ca 60 grader och byggdes upp av armerad sprutbetong mot den lutade schaktsidan som förankrades inåt med förspända stag. Den branta lutningen innebar att både friktion och kohesion i bankmaterialet utnyttjades som stabiliserande motstånd. Slänten utfördes i tre pallar med en höjd om maximalt två meter. För att minska risken för ras och rörelser utfördes slänten i fyra delmoment. Schaktning, betongsprutning, stagsättning och uppspanning skedde i etapper om 6 meter i längsled och 2 meter i höjdlid vid varje pall. Varje fack förankrades med två stag. Stagen spändes upp mot sprutbe-

tongen via två betongelement. Stagen förspändes så att jordtrycket motsvarade vilojordtryck som minimerade uppkomna rörelser i banken.

För att uppfylla de ställda kraven på maximala rörelser och beredskap, övervakades entreprenaden dygnet om. Det installerade säkerhetssystemet mätte automatiskt rörelser i släntkrönet med vertikala och lutande extensometrar samt krafter i förankringsstagen med stagkraftsgivare. Från givarna i slänten överfördes signaler till en mät dator på arbetsplatsen. I datorn kunde sedan mätresultaten behandlas och lagras. Om maximala rörelser riskerades att överskridas larmades arbetsplatsen och jourhavande geotekniker tillkallades.

Svar 1, 2 och 3

För att göra en prognos av de deformationer som förväntades uppstå gjordes ett antal beräkningar med Finita Element Metoden (FEM) innan arbetet påbörjades. Dessutom genomfördes ett antal deformationsberäkningar enligt klassisk jordmekanisk teori. Beräkningarna syftade till att göra en prognos av förväntad rörelseutveckling i spåren under arbetets genomförande. FEM-beräkningarna visade att det var möjligt att genomföra arbetet trots högt ställda krav på maximala rörelser. Beräkningarna visade också att hävningen av schaktbotten inte blev för stor och att stabiliteten i området var betryggande.

Svar 4, 5 och 6

Ett övervakningssystem installerades i samband med schaktningen. Systemet var sådant att när en deformationsmätare i slänten indikerar en kritisk släntrörelse gick ett ljudlarm på arbetsplatsen. När denna signal når arbetsledningen tändes platsledningen en röd ljussignal som tågföraren kan se varvid tåget kan stoppas och en olycka kan undvikas.

En viktig del i FEM-beräkningarna var att ge underlag för den förspänning av stagen som krävdes för att begränsa rörelsen i slänten. Principen var att förspänningen i stagen skulle motsvara vilojordtryck. Därmed kunde uppkomna rörelser i banken minimeras.

Beställaren kunde som tidigare behandlats inte acceptera rörelser som äventyrade trafiken på tunnelbanelinjen. Det krav på skonsamhet som ställdes innebar att övervakningen av de verkliga rörelserna jämfördes med de beräknade rörelserna enligt FEM. Om de verkliga rörelserna avvek från de beräknade rörelserna gav övervakningen underlag till beslut om lämplig åtgärd. Övervakningssystemet blev således

en viktig faktor för att få den nya metoden accepterad.

Övervakningssystemet innebar att de verkliga rörelserna kontinuerligt jämfördes med de beräknade rörelserna med hjälp av en grafisk utskrift från en mät dator. Om rörelsen översteg en viss larmnivå så larmades automatiskt tunnelbanecentralen och trafiken stoppades. Dessutom utsågs en ansvarig geotekniker som dygnet om var anträffbar vid larm.

Det installerade systemet mätte rörelser i slänkrönet med vertikala och lutande extensometrar samt krafter i förankringsstagen med stagkraftsgivare. Från givarna i slänten överfördes signaler till en mät dator på arbetsplatsen. I datorn kunde sedan mätresultaten behandlas och lagras. Om maximala rörelser riskerades att överskridas larmades arbetsplatsen och jourhavande geotekniker tillkallades.

Jämförelse prognos och verkligt beteende

Resultatet från mätningarna visar att mindre sättningar och hävning i spåret förekom under vissa arbetsperioder, speciellt under köldperioder. Lokalt uppkom även sättning i samband med stagborrning samt vid schaktning genom den tjälade markytan. Under schaktningen påträffades partier där fyllningen bestod av ensgraderat friktionsmaterial. Följden av detta blev att slänten föll ut i materialets friktionsvinkel och att schaktningen försvårades.

Genom exemplet kan klarläggas att det går att förutse, beräkna och reducera rörelser i friktionsjord. De rörelser som uppstod till följd av tjällyftning, rörelser vid stagborrning och uppspänning av stag kunde inte förutses och därmed inte beräknas. Exemplet visar att övervakningssystemet medförde att både förväntade och icke förväntade kunde uppmärksammas och styras genom att stagen successivt justerades i förspänningskraft under arbetets genomförande. Därmed uppstod inga större rörelser i banken. Genom övervakningen fick man också underlag till tidpunkt för att justera spåren och för att kompensera ojämna rörelser.

Sammanfattningsvis medförde det automatiska övervakningssystemet att rörelserna kunde kontrolleras och styras. Vissa brister i larmfunktionen medförde onödiga stopp i tunnelbanetrafiken vilket medförde att jourhavande geotekniker fick rycka ut i onödan. Rörelserna kunde beräknas genom FEM-beräkningar som senare bekräftades under arbetets genomförande. Det komplicerade grundläggningarbetet innebar inga problem för tunnelbanetrafiken.

EXEMPEL C:

Buller och vibrationer i byggnader

Detta är ett exempel på frågeställningar rörande buller och vibrationer inomhus som är vanliga vid grundläggningsarbeten med spont- eller påslagning.

Problembeskrivning

En tunnel för spårtrafik skall byggas i en stadskärna. Befintlig bebyggelse består av offentliga byggnader samt kontors- och bostadshus med blandad byggnadsteknisk standard. Tunnelbygget sker i öppet schakt vars väggar förses med stödspont längs hela sträckan.

Vid bland annat teater och konserthus sker spontslagning på 10 - 20 m avstånd, vid kontor och bostäder är avståndet något större. Buller- och vibrationsstörningar kan befaras i byggnaderna.

Bevakningslista - Buller och vibrationer

Före spontningsarbetets start uppläggs en plan för hur störningarna i berörda byggnader skall minimeras. Nedanstående lista innehåller frågeställningar som skall behandlas då planen upprättas.

- *Definitioner:* Med buller avses i detta fall dels luftljudsstörningar som från spontslagplatsen sprids via luften till störd byggnads rum vid fasad, dels sk stomljud inne i störd byggnad orsakat av markvibrationer från spontslagning. Med vibrationer avses de av markvibrationerna orsakade vibrationerna hos bjälklag i störd byggnad.
- *Involverade parter:* Byggherre (projektledare), entreprenör (projektansvarig, arbetsledare), myndigheter, fastighetsägare och boende.
- *Underlag:* Ritningar och beskrivning över spontningsarbetenas omfattning och utförande. Tidplan över företagets olika etapper.

Lista

1. För aktuell etapp upprättas grov prognos för väntade buller- och vibrationsnivåer i berörd bebyggelse. Beräknas enligt metodik i kapitel 6. Utgångspunkt är underlag enligt ovan samt byggnadernas grundläggning/konstruktion.
2. Tillämpa resultat av 1. samt myndighetsriktvärden med hänsyn till arbetenas varaktighet etc för att fastställa rimliga och lämpliga kravvärden (dag/kväll/natt) för buller och vibrationer inomhus i:
 - bostäder
 - kontor
 - teater, konserthus, sjukhus etc

Vid tveksamma fall, till exempel teater och konserthus, kan provspontning erfordras för att bedöma behov av tidsbegränsning för spontning eller verksamheten i byggnaden under perioden spontningen befinner sig som närmast.

3. Inventera vibrationskänslig utrustning (datorer, laboratorie- och sjukvårdsutrustning etc) i berörd bebyggelse. Inhämta leverantörers krav på max tillåtna vibrationsvärden
4. Ange vid behov möjliga alternativa neddrivningsmetoder samt de buller/vibrationsnivåer som kan åstadkommas
5. Vid behov övervägs fördelar/nackdelar med tidsrestriktioner för spontningsarbetena. Dvs att exempelvis undvika nattstörningar till priset av en totalt sett längre spontningsperiod.
6. Vid behov anges erforderliga åtgärder för att minska bullret (avskärmningar av slagstället, temporärt förbättrad fönsterisolering, minskad slagintensitet etc) och vibrationerna (minskad slagintensitet, metodbyte, utföra vibrationsisolering av vibrationskänslig utrustning i störd byggnad)
7. Upprätta plan och rutiner för hur de boende skall kontinuerligt informeras om när de berörs av planerade arbeten; i kritiska fall när avflyttning till alternativ bostad/kontorslokal är aktuell etc.

Appendix 2

BULLER

Ljudeffektdata

Detta appendix innehåller

- Sammanställda ljudeffektdata
- Ljudeffektnivåer i oktavband
- Beskrivning av maskintyper
- Utdrag från tabell med källdata

Sammanställda ljudeffektdata

I tabell A2.1 redovisas en sammanställning av ljudeffektdata från mer än 230 mätningar funna vid litteratursökningen.

Beteckningar i tabellhuvudet förklaras nedan:

Antal:	Antalet mätningar som ligger till grund för medelvärde på L_w
L_w , dBA Medel:	A-vägda ekvivalenta ljudeffektnivåns medelvärde då flera mätresultat finns på likadan utrustning.
a:	Standardavvikelse för medelvärdet med avseende på hela populationen dvs inte endast på de mätta exemplaren. Den ger en uppfattning om vilken noggrannhet man kan förvänta sig i prediktionen.
Max-min:	Differens i dBA mellan högsta och lägsta uppmätta ekvivalenta ljudeffektnivå för aktuell utrustningstyp.
Tid %:	Anger schablonvärde från referenserna på effektiv neddrivningstid, dvs hur stor andel av arbetstiden, som angiven ljudeffekt fås. Denna varierar stort med tex markförhållanden och skall ses som ett förslag till utgångsvärde.

Tabell A2.1 är sorterad efter Påltyp/Maskintyp/Åtgärd/ L_w

Beskrivning av maskintyper

Ljuddata har återfunnits för följande typer av utrustning;

1. Bottendriven hejare
2. Dieselhejare
3. Dieselhejare dubbelv.
4. Fallhejare
5. Fallgrävare
6. Fallvikt
7. Hydraulisk press
8. Hydraulisk dikesgrävare

9. Hydraulisk hejare
- 10 "Impact bored"
- 11 Jordbör diesel
- 12 Sonic
- 13 Tryckluftshejare
- 14 Tryckluftshejare dubbelv.
- 15 Luftimpulshejare dubbelv.
- 16 Vibro hejare
- 17 Vattenjet
- 18 Vibroreplacement
- 19 Ångehejare

Nedan följer en kort beskrivning av de olika utrustningarna/neddrivningsmetoderna samt på vilket sätt de alstrar buller.

1. Bottendriven hejare

En fallhejare driver en plugg av grus eller betong i botten av ett stålrör ner i marken. När önskat djup uppnåtts fixeras stålröret och pluggen drivs ut genom botten på röret. Hålet kan förstöras genom att ytterligare betong drivs ut genom botten. Alternativt används ihåliga pålar med täppt botten som drivs internt. Ljudnivån är lägre än för andra slagmetoder genom att slagstället befinner sig under jord. Ex "Bottom Driven Franki Pile" (World Construction) (Harjodh S. Gill 1982) (West A.S. 1981)

2. Dieselhejare

Består av en fri kolv i en cylinder. Kolven kan väga flera ton. Kolven lyfts genom att en bränsle/luft blandning exploderar mellan kolv och pålhuvud. Kolven faller sedan fritt ner mot pålhuvudet och en ny laddning antänds. Ljud alstras framförallt vid slaget mot pålhuvudet och när avgaserna släpps ut (Harjodh S Gill 1982)

3. Dieselhejare dubbelverk.

Samma princip som för enkelverkande dieselhejare, men kolven accelereras ytterligare på sin väg nedåt av en andra explosion i kolvens övre vändläge. (Harjodh S. Gill 1982)

4. Fallhejare

En hejare lyftes med linor och släpps fritt på påle eller spont. Ljud alstras framförallt vid slaget mot pålhuvudet och av skrammel från påltorn och linor. (Bennerhult, O, 1983)

5. Fallgrävare

Även kallad Benoto metoden. En grävutrustning släpps med fritt fall ner i marken. Framändan sluts och utgrävt material lyfts upp. Huvudsaklig bullerkälla är ofta kringutrustning som kran och hydraulaggregat.

Tabell A2.1. Ljudeffektdata från mer än 230 mätningar.

Nr	Påltyp	Maskintyp	Åtgärd	Antal	Lw, dBA Medel	a	Max-min	Tid %
1	Spont	Dieselhejare		9	128	6	22	85
		Avskärmning		1	123		0	85
		Delvis inbyggd		2	117	1	1	80
		Inbyggd		3	112	8	15	75
2	Spont	Dieselhejare dubbelv.	Mellanlägg	2	138	4	5	85
3	Spont	Fallhejare		4	125	3	7	70
		Avskärmning		2	115	7	10	70
		Mellanlägg		11	111	6	21	70
		Inbyggd		6	99	7	18	60
4	Spont	Hydraulisk press		8	97	5	19	75
5	Spont	Hydraulisk hejare	Inbyggd	2	117	6	8	85
		Mellanlägg		1	112	0	85	
6	Spont	"Sonic" hejare		2	111	4	6	50
7	Spont	Tryckluftshejare		12	131	5	13	75
		Delvis inbyggd		1	127		0	70
		Dämpad spont		1	125		0	70
		Mellanlägg		2	120	1	2	70
		Inbyggd		7	113	7	19	60
8	Spont	Tryckluftshejare dubbelv.		4	124	9	21	70
9	Spont	Luftimpulshejare dubbelv.		3	112	1	2	70
10	Spont	Vibro Hejare		10	116	3	11	50
11	Spont	Vatten jet		1	99	0	50	
		Eldriven utrustning		1	93	0	50	
12	Ett par spont	Fallhejare		2	127	6	9	70
		Avskärmning		2	113	6	8	70
		Mellanlägg		1	107		0	70
		Inbyggd		1	97		0	60
13	H-sektion	Dieselhejare		2	124	2	3	85
14	H-sektion	Dieselhejare dubbelv.	Mellanlägg	1	127		0	85
15	H-sektion	Fallhejare	Mellanlägg	1	125		0	70
16	H-sektion	Hydraulisk hejare	Mellanlägg	1	124		0	85
		Inbyggd		2	115	2	3	75
17	Rörpåle stål	Bottendriven Hejare		5	114	2	5	80
18	Rörpåle stål	Dieselhejare		2	131	1	2	85
19	Rörpåle stål	Dieselhejare dubbelv.		2	127	7	10	85
20	Rörpåle stål	Fallhejare		1	133	0	70	
		Delvis inbyggd		2	127	3	4	65
		Mellanlägg		6	125	5	14	70
		Delvisinbyggd						
		+mellanlägg		3	120	3	5	65
		Pålning i vattenl		1	118		0	60
		Inbyggd		1	106	0	60	
21	Rörpåle stål	Tryckluftshejare		1	116	0	75	
22	Betongpåle	Dieselhejare		2	131	6	8	85
		Inbyggd		2	105	4	6	75
23	Betongpåle	Fallhejare	Inbyggd	6	120	3	10	60
		Mellanlägg		6	117	4	9	70
24	Betongpåle	Hydraulisk hejare		3	115	4	8	85
		Inbyggd		4	108	2	5	75
25	Rörpåle betong	Fallhejare	Mellanlägg	3	120	5	10	70
26	Platsgj. påle	Fallhejare		4	126	4	9	70
		Mellanlägg		2	119	1	1	70
27	Platsgj. påle	Impact Bored		4	108	5	9	85
28	Platsgj. påle	Jordborr		21	114	5	22	50
		Inbyggd		7	110	2	5	50
	Kringutrustn.			2	109	3	4	100
29	Platsgj. påle	Tryckluftshejare		1	127	0	85	
		Inbyggd		2	118	2	3	75
30	Platsgj. påle	Vibro Hejare		1	125	0	50	
31	Stenpelare	Vibroreplacement		2	114	5	7	50
32	Slitsvägg	Fallgrävare		1	113		0	50
33	Slitsvägg	Hydraulisk dikesgrävare		2	115	1	2	70
34	Ytkompaktering	Fallvikt		2	124	2	3	70
35		Kringutrustning		2	112	3	4	100

(Begränsning av støy fra bygge-og anleggningsvirksomhet, 1976)

6. Fallvikt

Marken packas genom att en vikt på 10 - 20 ton släpps fritt från 10 - 25 m höjd. Vikten lyfts med en stor kran. Ljud alstras både av kranen vid lyftet och när vikten träffar marken. (BS 5228, 1992)

7. Hydraulisk press

Sponten pressas ned hydrauliskt. Hydraulikaggregatet kan vara el- eller dieseldrivet. Några spont drivs först ned med konventionell metod. Maskinen ställs på dessa spont som sedan används som mothåll när nästa spont pressas ned. Maskinen kan sedan förflytta sig i sidled på sponten för att kunna pressa ned nästa spont. Huvudsaklig bullerkälla är hydraulaggregatet. Ex Taywood "Pilemaster" och "Silent Piler". (Gill, S, 1979) (Ljudlös spontslagning utan vibrationer) (Silent-Piler) (BS 5228, 1992).

8. Hydraulisk dikesgrävare

En slitsvägg grävs under en Bentonit fyllning. Betong pumpas in underifrån. Metoden kräver omfattande kringutrustning, ex kranar, pumpar, utrustning för tillverkning av armering och Bentonitframställning. Ljudalstringen beror i hög grad på typen av kringutrustning. (BS 5228, 1992)]

9. Hydraulisk hejare

En hydrauliskolv lyfter hejaren från pålen. Hejaren släpps sedan fritt ned mot pålen. Ex BANUT 400. (Grose W,J, 1986)

10."Impact bored"

Ett hål tas upp genom att man slår ner ett rör i marken. Röret dras upp och en prefabricerad påle förs ned alt. gjuts en påle på plats. (BS 5228, 1992)

11. Jordborr diesel

Ett hål med samma diameter som pålen borrar för att skapa en form för en platsgjuten eller att sätta ner en prefabricerad påle. Igjutningen sker genom att betong pumpas genom borrets centrum när man nått önskat djup. Ibland slås även ett stålrör ned för att fungera som form. Ex Soilmec CM45, Drillfrance CB9. (Miller, F.L)

13. Sonic

En utveckling av vibrohejare där drivfrekvensen anpassas till en frekvens hos någon av pålens longitu-

dinalvågmoder, i allmänhet i området 60 - 130 Hz. (Harjodh, S. Gill, 1982)

14. Tryckluftshejare

Samma princip som dieselhejare förutom att tryckluft används för att accelerera kolven. (Harjodh, S, Gill, 1982)

15. Tryckluftshejare dubbelverkande

Samma princip som dubbelverkande dieselhejare förutom att tryckluft används för att accelerera kolven. (Harjodh S. Gill, 1982)

16. Luftimpulshejare dubbelverkande

Neddrivning sker genom att impulser skapas i en drivdel med hjälp av tryckluft. Drivdelen ligger mellan dyna och motvikt. Drivdelens höjd ökas med en tryckluftsimpuls som höjer motvikten samtidigt som dynan och sponten trycks nedåt. Motvikten faller sedan tillbaka på drivdelen som trycks samman samtidigt som dyna och spont pressas nedåt igen. Ex Stabilator "Impulse Driver". (Quieter sheet pile driving, 1974)

17. Vibrohejare

En roterande obalans vibrerar pålen som sedan drivs ner av maskinens vikt. Buller alstras framförallt genom utstrålning från spont. Detta gäller speciellt vid långa spontväggar med stor yta som avger ljud. Drivfrekvenser 2 - 25 Hz. (Gill, H.S, 1979) (Begränsning av støy fra bygge- og anleggningsvirksomhet, 1976) (Harjodh S.Gill, 1982)

18. Vattenjet

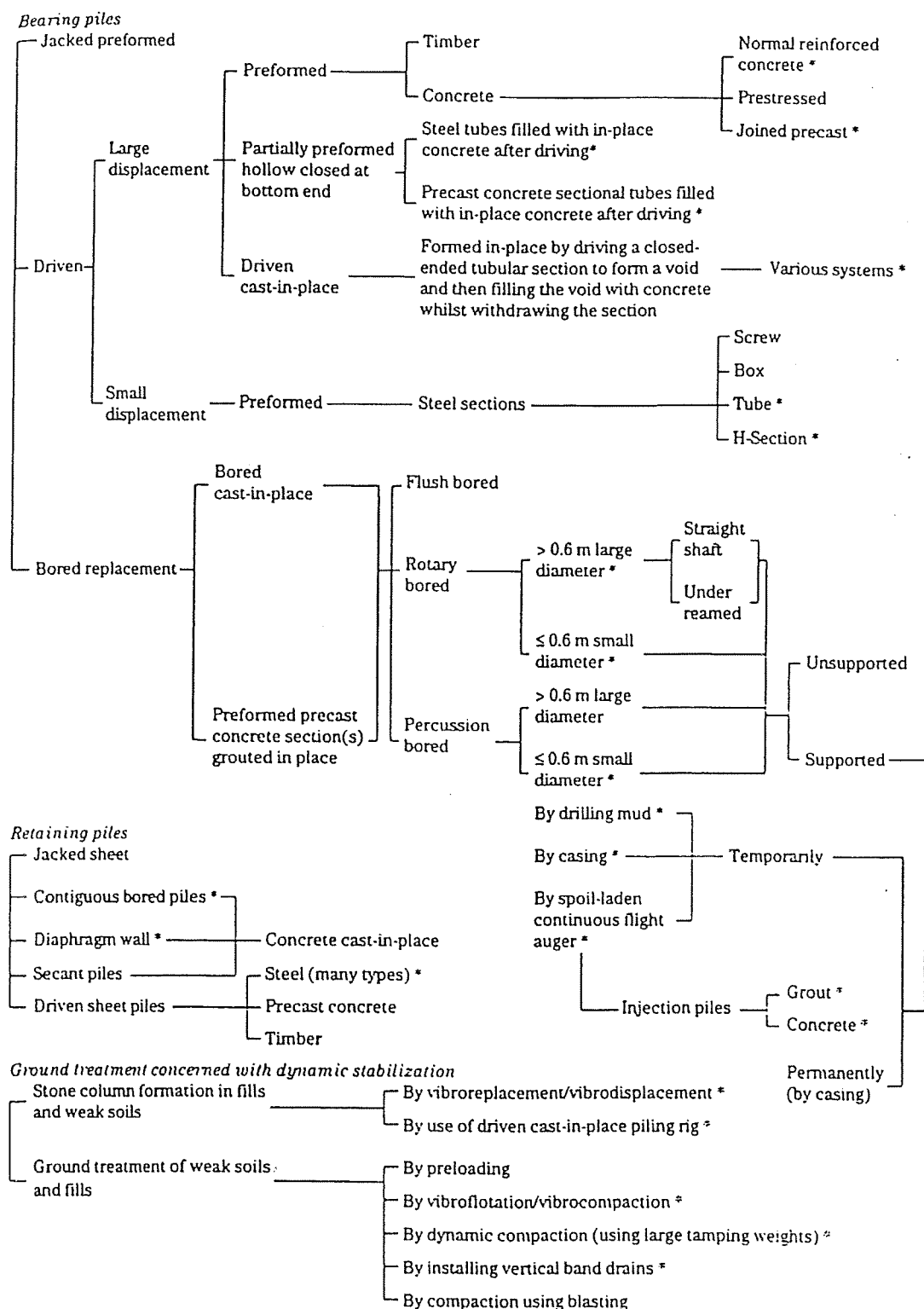
Ett vattenjetaggregat som spolar undan jorden trycks ner med statisk belastning tillsammans med ett spont. Ett japanskt företag kallar metoden D.J.P. (Kawasaki Y)

19. Vibroreplacement

En vibrerande stav drivs ner i marken. Drivningen sker elektriskt eller hydrauliskt. Efterhand som jorden packas fylls grus och sten på. Ljud alstras huvudsakligen av drivpaket och generatorer. (BS 5228, 1992)

20. Ångehejare

Samma princip som dieselhejare förutom att tryckluft används för att accelerera kolven. (Harjodh S. Gill, 1982)



NOTE 1. It should always be remembered that the type of pile to be used on any site is normally governed by such criteria as loads to be carried, strata to be penetrated and the economics of the system.

NOTE 2. Where necessary, allowance should be made for the extraction of piles in addition to their installation.

NOTE 3. Sound level data for systems marked thus * are included in table 1. Other data may be found in table 8 of BS 5228 - Part 1: 1984.

Figur A2.1. Olika pältyper och neddrivningsmetoder. Från (BS 5228, 1992)

Appendix 3

LJUDMÄTNINGAR

I detta appendix redovisas tre olika metoder för ljudmätningar:

- Typ A; emissionsmätningar med höga krav på mätnoggrannhet
- Typ B; emissionsmätningar med normala krav på mätnoggrannhet
- Typ C; immissionsmätningar

Samt ett mätprotokoll.

Typ A; emissionsmätningar med höga krav på mätnoggrannhet

Flera alternativa standarder finns för utförandet. Bland annat följande:

- SS-ISO 6393 AKUSTIK - Mätning av buller från byggmaskiner - Metod för verifiering.
- SS-ISO 4872 Byggmaskiner - Akustik - Mätning av luftburet buller från byggmaskiner utomhus - Metod för undersökning av att bullergränser innehålls.
- CEN/TC 151/ WG 2 N15 , Rev 7 E Piling equipment, Safety requirements

Driftsförhållanden

Ingen av ovanstående standarder definierar driftvillkor för påslagningen. I Bennerhult (1983) finns ett förslag till definition av driftsförhållanden vid bestämning av ljudeffektnivåer som återges nedan. Förslaget är endast tillämplbart på neddrivning med släende eller vibrerande metoder.

"Om man betraktar det vid påslagnings dominerande egentliga slagningsbullret har vi vid de orienterande mätningarna funnit att detta i huvudsak är konstant under en slagning med konstant fallhöjd. Stoppslagning ger 1-2 dBA högre nivå än neddrivning. Påsens längd ovan mark har liten betydelse på grund av att påsen inte nämnvärt bidrar till ljudavstrålningen. Det har antagits att bullret vid stoppslagning är minst påverkat av markförhållandena och även utgör ett värsta fall och därför är ett lämpligt mätfall.

Maskinens allmänna driftvillkor som arbetstemperatur hos motor och transmission etc skall vara normala. Hjälp-utrustning, till exempel kompressor, skall vara i drift.

Vi har valt att betrakta påslagningsmaskiner som i huvudsak stationära vilket innebär att följande driftvillkor, enligt det bakomliggande normförslaget, skall genomföras:

- a. Motorns varvtal ökas snabbt från tomgång till max varvtal (begränsat av varvtalsregulator).

- b. Låt motorns varvtal stabiliseras vid max varvtal.
- c. Med bibehållet max varvtal kopplas hejarens lyftmekanism in så att hejaren lyfts från lägsta till maximal höjd.
- d. Stoppslagning av påle med dimensioner 235 x 235 mm typ B 450 enligt gällande stoppslagningskriterier, SBN S 23:6 (Statens Planverks Pålnormer).

Pålhuvudet skall befinna sig 1-3 m över markytan och påsens totala längd skall vara minst 8m. Påsen skall ej vara försedd med skarvbeslag i överänden. Mellanlägget skall vara väl sammanslaget (200-300 slag)."

Typ B; emissionsmätningar med normala krav på mätnoggrannhet

Driftsförhållanden

Parametrar vid provpåslning bör väljas så lika de som planeras i själva projektet som möjligt med avseende på maskinutrustning, slagenergi, påltyp och längd, markförhållanden. Förväntas någon parameter variera kraftigt under projektets gång bör man undersöka dess inverkan på ljudnivån redan vid provpåslningen för att kunna göra predikteringen av förväntad ljudnivå under själva projektet säkrare.

Instrumentering

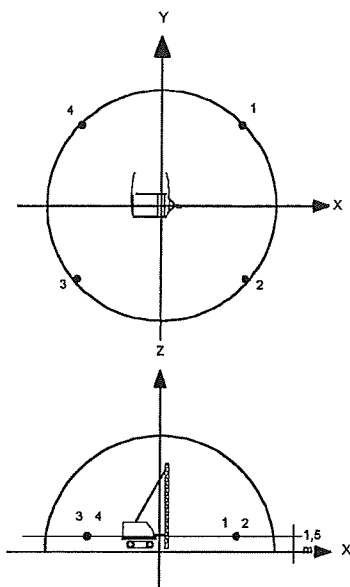
Minimikrav; integrerande ljudnivåmätare klass 1 eller 2 enligt "IEC publikation 179". Instrumentet skall kunna mäta A-vägs ekvivalentnivåer samt maxnivåer med tidskonstant "FAST" och "IMPULSE". Stoppur.

Det är dessutom fördelaktigt att registrera ljudnivåns tidsvariation med bandspelare. Inspelning på mätbandspelare medger en noggrannare analys av ljudets tidsvariation och karaktär (frekvensinnehåll) i efterhand.

Mätmetodik

Sist i detta appendix visas en blankett där driftsförhållanden och mätresultat antecknas vid provpåslning.

- **Mätpunkterna;** Mätpunkterna väljs med hänsyn till de generella anvisningarna (i tillämpliga delar) i Svensk Standard SS-ISO 6393, "Mätning av buller från byggmaskiner - Metod för verifiering" och CEN/TC 151/ WG 2 N15 kapitel 5. Se figur A3.1

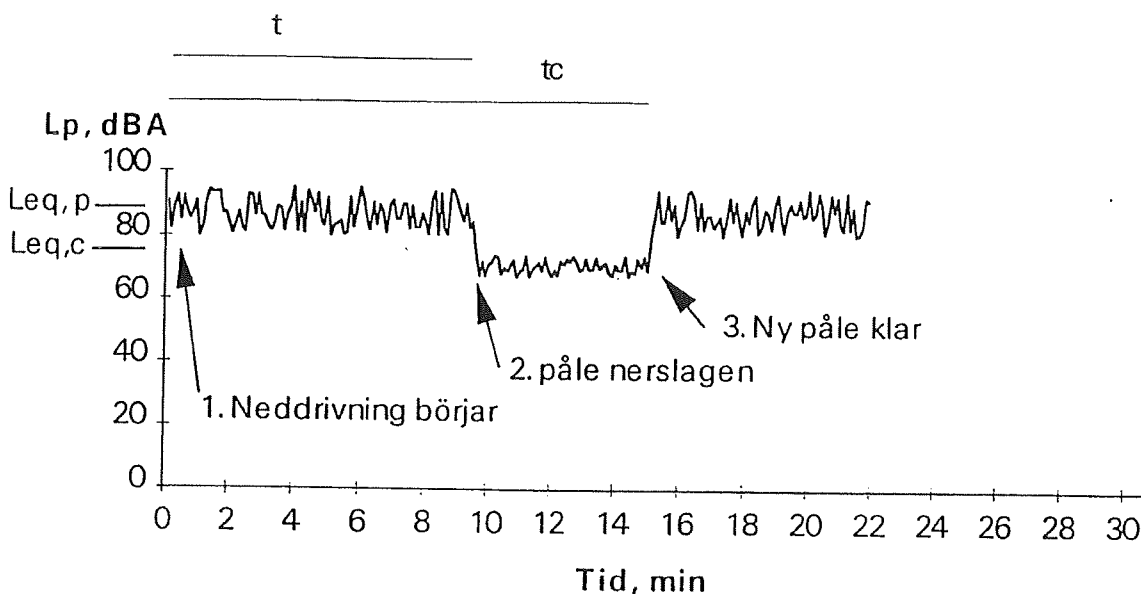


Figur A3.1. Mätpunkter vid emissionsmätning enl. SS-ISO 6393.

Avståndet r till den bullrande utrustningen bör inte väljas kortare än 15 m. För att mätningen skall kunna ses som frifältsmätning får inga ovidkommande föremål finnas, såsom byggnader, plank etc.

- **Bakgrundsniån** skall vara minst 3 och helst 10 dB lägre än ljudet från maskinen. I intervallet mellan 3 och 10 dB kan korrigering göras med följande formel:

$$L_{eq} = 10 \cdot \log \left[10^{\frac{L_{eq,M}}{10}} - 10^{\frac{L_{eq,B}}{10}} \right] \text{ dB}$$



Figur A3.2. Definition av L_{eq} för pålningsfas t_p och sättningsfas t_s .

där L_{eq} är verklig ljudnivå, $L_{eq,M}$ är uppmätt ljudnivå inklusive bakgrundsbuller vid drift och $L_{eq,B}$ är uppmätt ekvivalent bakgrundsniån. Se även figur A4.3 under appendix 4.

- **Väderlek;** mätningar får inte utföras i nederbörd. Mätning med snötäckt mark bör endast utföras i det fall man förväntar sig snötäckt mark under det kommande pålningsarbetet.

Ex. Uppmätt ljudnivå $L_{eq,M} = 88$ dBA
Bakgrundsniån $L_{eq,B} = 84$ dBA
Nivå att dra ifrån uppmätt nivå för att få verklig L_{eq} är 2 dB
dvs $L_{eq} = 86$ dBA

- **Mättid;** I varje mätpunkt skall L_{eq} mätas under 20 - 30 s när pålning pågår. Varierar L_{eq} väsentligt under neddrivningen (mer än 5 dBA) skall mätning utföras under en hel arbetscykel. Om bakgrundsniån tillåter bör L_{eq} mellan neddrivningsperioderna avläsas. Tiden för pålningsfas t_p och hel cykel t_c antecknas (se exempel i figur A3.2). Används bandspelare kan all utvärdering utföras i efterhand.

Finns krav även på högsta tillåtna maxnivå avläses den ca 10 ggr i varje mätpunkt och ett medelvärde bildas. Är antalet provpålar få, bör man använda sig av flera ljudnivåmätare alternativt flerkanalig bandspelare.

- **Beräkning av ljudeffekt;** I nedanstående formler används L_p för att beteckna både L_{eq} och L_{max} . Medelvärde av N st ekvivalenta ljudnivåer under pålningen bestäms som ett logaritmiskt medelvärde.

$$\overline{L_p} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{N} \sum 10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_{pN}}{10}} \right]$$

Ur ljudtrycksnivåns medelvärde $\overline{L_p}$ bestäms sedan ljudeffektnivån som

$$L_w = \overline{L_p} - 10 \cdot \log \left(\frac{\arctan\left(\frac{l}{d}\right) \pi \cdot d}{l \cdot 180} \right) - 20 \cdot \log d - 8 \text{ dB}$$

d är avstånd från mät punkt till ljudkällans centrum i m

l är ljudkällans höjd i m.

För underlätta beräkningen av L_w hänvisas till tabell A3.1, där $L_w - \overline{L_p}$ kan utläsas. Beräkningarna har utförts enligt [VDI 2714]

Framräknat L_w kan nu användas på samma sätt som tabelldata givna i tabell A2.1.

Typ C; immissionsmätningar

Denna typ av mätningar beskrivs i (Buller från byggsplatser 1975).

Driftsförhållanden lika typ B

Instrumentering

Minimikrav; integrerande ljudnivåmätare klass 1 eller 2 enligt "IEC publikation 179". Instrumentet skall kunna mäta A-vägda ekvivalentnivåer samt max-nivåer med tidskonstant "FAST". Stoppur.

Mätmetodik

Sist i detta appendix visas en blankett där driftsförhållanden och mätresultat antecknas vid provpålning.

- **Mätpunkterna;** I öppet fönster mot byggsplatsen. Man bör även komplettera med mätning mitt i rum med stängt fönster både i rum som vetter mot byggsplatsen och i rum på andra sidan byggnaden. För att få en uppfattning om hur ljudnivån påverkas av mät punkten kan följande riktlinjer användas.

Tabell A3.1.

$L_w - L_p$, dB				$L_w - L_p$, dB			
r meter	l = 5 m	l = 10 m	l = 15 m	r meter	l = 5 m	l = 10 m	l = 15 m
1	14	16	18	30	38	38	38
2	17	20	21	35	39	39	39
3	20	22	23	40	40	40	40
4	21	23	25	45	41	41	41
5	23	25	26	50	42	42	42
6	24	26	27	60	44	44	44
8	27	28	28	70	45	45	45
10	28	29	30	80	46	46	46
12	30	30	31	90	47	47	47
14	31	32	32	100	48	48	48
16	32	33	33	200	54	54	54
18	33	34	34	300	58	58	58
20	34	34	35	400	60	60	60
25	36	36	36	500	62	62	62

- Mätningen betraktas som frifältsmätning om avståndet fasad-mät punkt är minst lika stort som avståndet mät punkt-bullerkälla, dock minst 15 m. Frifältsmätning antas ge ljudnivån $L_{p, fri}$ dBA.
- Placeras mikrofonen dikt an mot fasaden fås ljudnivån $L_{p, fri} + 6$ dBA.
- Placeras mikrofonen mellan 2 m och 15 m från fasaden fås ljudnivån $L_{p, fri} + 3$ dBA.
- Placeras mikrofonen i ett öppet fönster i fasad-linjen fås ljudnivån $L_{p, fri} + 1$ dBA, kan variera något beroende på rummets dämpning.

- Bakgrundsnivån lika typ B.
- **Väderlek;** Mätningar får inte utföras i nederbörd som påverkar ljudnivån vid mätningen. Mätning med snötäckt mark bör endast utföras i det fall man förväntar sig snötäckt mark under det kommande pålningsarbetet. Vid avstånd större än ca 250 m skall mätningarna utföras med vind i riktning från källa till mät punkt $\pm 45^\circ$ med en vindstyrka på högst 5 m/s.
- **Mättid;** lika typ B

Mätprotokoll ljudmätning		Ort:	Datum:
Objekt: Skiss över arbetsplatsen bifogas.			
Utrustning	Tillverkare:	Modell:	Neddrivningsmetod:
Hejarens vikt:	Fallhöjd:	Slagenergi:	Slag/min:
Ljuddämpande åtgärder:		Mellanlägg hejare/dyna:	
Påle/Spont	Typ/material:	Längd:	Dimension:
Nedslagningsdjup:	Mätningen utfördes under: hel arbetscykel, sättning, neddrivning, stoppslagning	För spontvägg, antal samtidigt slagna spont:	Dimension på redan satt spontvägg:
Markegenskaper	Ytbeskaffenhet mellan slagställe och mät punkt:		
Marktyp:			
Mätutrustning	Fabrikat och typ:		
Kommentarer till mätningarna:			

Appendix 4

DEFINITIONER AV STORHETER FÖR BULLER OCH VIBRATIONER

Definition av storheter

Enligt standard ISA 1683.2 gäller:

Nivåangivelser för ljud

- L_p Ljudtrycksnivå i dB relativt referensnivån.
 $2 \cdot 10^{-5}$ Pa,

$$L_p = 20 \cdot \log\left(\frac{p}{2 \cdot 10^{-5}}\right)$$

p = ljudtrycket, Pa

- L_w Ljudeffektnivå i dB relativt referensnivån
 10^{-12} W,

$$L_w = 10 \cdot \log\left(\frac{W}{10^{-12}}\right)$$

W = ljudeffekten Watt

Nivåangivelser för vibrationer

- L_d Vibrationsamplitudnivå i dB rel. referensnivån
 10^{-6} mm,

$$L_d = 20 \cdot \log\left(\frac{d}{10^{-6}}\right)$$

d = vibrationsamplitud (förflyttning), mm

- L_v Hastighetsnivå i dB rel. referensnivån
 $5 \cdot 10^{-9}$ mm/s,

$$L_v = 20 \cdot \log\left(\frac{v}{5 \cdot 10^{-9}}\right)$$

v = hastighet, m/s

(Även ref.nivå $5 \cdot 10^{-8}$ m/s används)

- L_a Accelerationsnivå i dB rel. referensnivån
 10^{-6} m/s²,

$$L_a = 20 \cdot \log\left(\frac{a}{10^{-6}}\right)$$

a = acceleration, m/s²

(Även ref.nivå 10^{-2} m/s används)

Frekvensvägningar

Lin Linjärt värde. Om inget anges menas linjärt värde, dvs utan någon frekvensvägning (filtrering).

A A-vägning, en filtrering som efterliknar örats känslighet för ljud vid olika frekvenser. Ljudtrycksnivå med A-vägning anges i dBA och benämnes ofta enbart "ljudnivå".

C C-vägning, en filtrering som används främst vid enstaka höga impulsljud t ex skottbuller. Dämpar inte lågfrekvent ljud lika mycket som A-Vägning. Ljudtrycksnivå med C-vägning anges i dB C.

Tidsvägningar

Vid mätning av ljud med stora och hastiga nivåvariationer tex påslagning kan anges

L_{eq} Ekvivalent nivå, ett energimedelvärde för aktuell mättid.

$L_{Max,SLOW}$ Maximal effektivvärdesnivå (RMS) med tidskonstant SLOW, 1 sekund

$L_{Max,FAST}$ Maximal effektivvärdesnivå (RMS) med tidskonstant FAST, 125 millisekunder

$L_{Max,IMPULSE}$ Maximal effektivvärdesnivå (RMS) med tidskonstant IMPULSE, 35 millisekunder, motsvarar ungefär örats "snabbhet".

$L_{Max,PEAK}$ Ljudtryckets verkliga toppnivå, i realiteten finns en tidskonstant som beror på ljudnivåmätarens prestanda, vanligen ca 30 - 50 mikrosekunder.

Ovanstående parametrar kombineras efter omständigheterna. Formellt sett skall en parameter från varje grupp användas. I litteraturen utelämnas dock ofta någon dem där det anses "givet" vad som avses.

Några exempel:

L_{Aeq} A-vägd, ekvivalent ljudtrycksnivå

L_{WA} A-vägd, ekvivalent ljudeffektnivå

$L_{a, Max, Slow}$ Linjär, maximal, accelerationsnivå med tidskonstant SLOW

$L_{p, Max Peak}$ Linjär, maximal, ljudtrycksnivå med tidskonstant PEAK

Omvandlingar av vibrationsstorheter

Vibrationer anges ofta som förflyttning, hastighet eller acceleration. För att underlätta omvandling tex för jämförelse med olika riktvärden finns en omvandlingstabell (tabell A4.1) för de vanligaste storheterna.

Tabell A4.1. Omvandlingstabell för de vanligaste storheterna

Önskad storhet	Som funktion av frekvens f (Hz) och			
	Förflytn. d (mm)	Hast. v (mm/s)	Accel. a (m/s ²)	Accel. a_g (g)
Amplitud. d (mm)		$d = \frac{v}{6,28 \cdot f}$	$d = \frac{25,3 \cdot a}{f^2}$	$d = \frac{248 \cdot a_g}{f^2}$
Hast. v (mm/s)	$v = 6,28 \cdot d \cdot f$		$v = \frac{159 \cdot a}{f}$	$v = \frac{1560 \cdot a_g}{f}$
Accel. a (m/s ²)	$a = \frac{d \cdot f^2}{25,3}$	$a = \frac{v \cdot f}{159}$		$a = a_g \cdot 9,81$
Accel. a_g (g)	$a_g = \frac{d \cdot f^2}{248}$	$a_g = \frac{v \cdot f}{1560}$	$a_g = \frac{a}{9,81}$	

Tabell A4.2. Omvandlingstabell mellan vibrationsnivåer.

Önskad storhet	Som funktion av frekvens f (Hz) och		
	Förflytn.nivå L_d , dB	Hastigh.nivå L_v , dB	Accel.nivå L_a , dB
Förflytn.nivå L_d , dB		$L_d = L_v - 76 - 20 \cdot \log f$	$L_d = L_a - 32 - 40 \cdot \log f$
Hastigh.nivå L_v , dB	$L_v = L_d + 76 + 20 \cdot \log f$		$L_v = L_a + 44 - 20 \cdot \log f$
Accel.nivå L_a , dB	$L_a = L_d + 32 + 40 \cdot \log f$	$L_a = L_v - 44 + 20 \cdot \log f$	

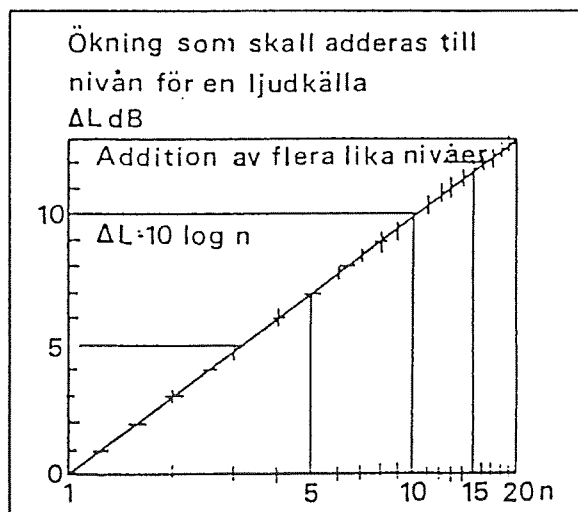
Vid omvandling mellan vibrationsnivåer gäller enligt *tabell A4.2*, med tidigare angivna referenser. Används andra referenser för förflyttning, hastighet och acceleration ändras uttrycken i tabellen.

Addition och subtraktion av dB

Addition av ett antal lika ljud- eller vibrationsnivåer

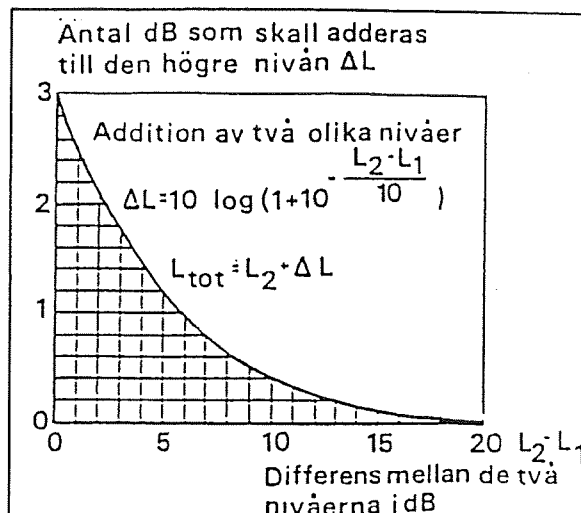
I *figur A4.1* kan utläsas hur stor sammanlagda ljud- eller vibrationsnivån blir när flera källor med lika ljudnivå adderas.

Figur A4.1. Addition av lika nivåer.



Addition av ljud- eller vibrationsnivå från två ljudkällor med olika ljudnivå

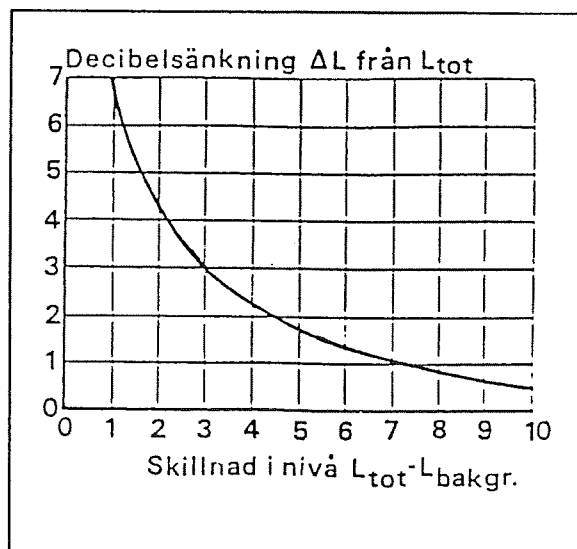
Givet: skillnad i ljudnivå $L_2 - L_1$ i dB mellan två källor. Ur *figur A4.2* avläses tillskott i ljudnivå ΔL att lägga till den högre nivån.



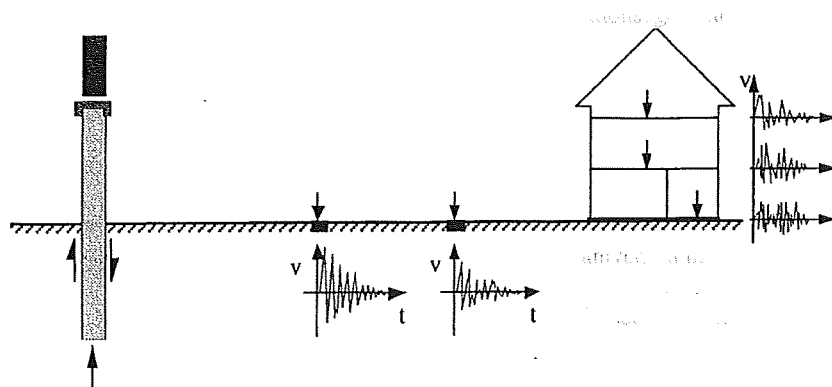
Figur A4.2. Addition av olika nivåer.

Korrektion för bakgrundsnivå

Givet: skillnad i ljudnivå mellan totalnivå och bakgrundsnivå $L_{\text{tot}} - L_{\text{bakgr}}$ i dB. Ur *figur A4.3* avläses korrektion ΔL att dra ifrån den högre nivån L_{tot} .



Figur A4.3. Korrektur för bakgrundsnivå.



Placeras på framsidan utan text

