

Benledningshörapparater – att höra genom skallbenet

Med hjälp av benledningshörapparater fortleds ljud via skallbenet till hörselorganet. Benledningshörapparater är användbara framför allt vid mekanisk blockering av hörselgången och mellanörat på grund av medfödda eller förvärvade defekter.

Ljudvågor stimulerar det cortiska organet i hörselnsäckan genom att via hörselgången sätta trumhinnan och hörselbenen i svängning. Vibrationerna fortleds till innerörevätskan i hörselsäckan vilket leder till en stimulering av hörselnerven. Detta kallas för att höra genom luftledning. Ljudvågor når också hörselsäckan via skallbenet, vilket kallas för att höra genom benledning. Ljudvågor överförs då som vibrationer i skallbenet, och följaktligen vibrerar även hörselsäckan. Innerörevätskan sätts då i rörelse på samma sätt som av luftlett ljud. Genom experiment av von Békésy [1] är det visat att hörselsäckan stimuleras på samma sätt oavsett om ljudet är luft eller benlett. Det mest vardagliga benledda ljudet är vår egen röst. När vi hör vår egen röst är det en kombination av röstljudet som går ut genom munnen, vilket är luftlett, och det som går via gom, käkar och skallben som benlett ljud. Det är förklaringen till att vi tycker att vår röst låter annorlunda då vi hör den inspelad, då det inspelade ljudet endast är luftlett ljud.

Hörselnedsättning på grund av att hörselsäckan eller nervbanor centralt om hörselsäckan inte fungerar normalt kallas för sensorineural hörselnedsättning. Vid defekter i hörselgång, trumhinna eller mellanöra, vilket innebär att ljudet har svårt att nå en normalt fungerande hörselsäck, får man en hörselnedsättning som kallas ledningshinder. En kombination av de båda typerna kallas för blandad hörselnedsättning. Av intresse för benledningshörapparater är även ett tillstånd som kallas ensidig dövhet, då ena sidans hörselsäck har en gravt nedsatt funktion eller inte fungerar alls.

DEN BENFÖRANKRADE HÖRAPPARATEN – BAHA

Vid medfödda missbildningar av ytterörat, hörselgången och mellanörat kan ljudvågor hindras från att nå hörselsäckan via luftlett ljud. Andra exempel när samma problem uppstår är vid kroniskt inflammerade öron, en stel hörselbenskedja eller på grund av postoperativa defekter. Finns det en öppning i en retningsfri hörselgång går det att förstärka ljudet med vanliga hörapparater. Om det inte finns någon hörselgång, eller om hörselgången är kroniskt irriterad, kan en benledningshörapparat användas för att omvandla ljudvågor i luften till mekaniska vibrationer i skallbenet som då stimulerar hörselsäckan med benlett ljud. Tekniken har funnits länge i form av högtalare/vibrator som appliceras mot huden bakom örat med en stålstång. Denna teknik innebär dock dålig ljudkvalitet och obehag då apparaten trycker hårt

Måns Eeg-Olofsson,
docent, överläkare,
öron-, näs- och hals-
sjukvård, Sahlgrenska
universitetssjukhuset,
Göteborg
● mans.eeg-olofsson@
vgregion.se

mot huden. Genom ett samarbete mellan Sahlgrenska universitetssjukhuset och Chalmers tekniska högskola utnyttjades Per Ingvar Brånemarks banbrytande upptäckt att titan fäster unikt i levande ben med osseointegration [2]. Man prövade att förankra en hudgenomförande titanskruv i skallbenet bakom örat och att på titanskruven fästa en ljudvibrator [3]. Det visade sig under mångåriga studier på ett litet antal patienter att konceptet fungerade. Professor Bo Håkansson (Chalmers) konstruerade den första benförankrade hörapparaten (BAHA) och docent Anders Tjellström (Sahlgrenska) utvecklade den kirurgiska tekniken [4, 5]. I dag beräknas över 300 000 personer i världen använda BAHA (Figur 1).

Den kirurgiska tekniken har med åren utvecklats från att avlägsna mjukvävnad runt skruven till den i dag dominerande metoden att bevara all mjukvävnad runt skruven [6, 7] (Figur 2A). Ingreppet tar i dag på en vuxen patient cirka 10–30 minuter, och på barn oftast något längre tid. Titanskruven, som finns i längderna 3 mm och 4 mm, har också utvecklats och är i dag bredare (4,5 mm i stället för tidigare 3,75 mm). Skrugängornas yta har också på olika sätt försetts med en något grövre struktur jämfört med de tidiga skruvarnas jämna titanyta.

Indikationerna för BAHA är ledningshinder, blandad hörselnedsättning och ensidig dövhet. Exakta gränser för hörselnedsättningen finns inte utan beror på hur patienten både objektivt presterar och subjektivt bedömer nyttan med BAHA jämfört med till exempel en konventionell hörapparat. En fördel med BAHA är att man kan testa hörselnyttan genom att

HUVUDBUDSKAP

- Benledningshörapparater är indicerade vid ledningshinder och vid blandad hörselnedsättning där konventionella hörapparater inte går att använda eller är ett sämre alternativ.
- Benledningshörapparater är också ett alternativ vid ensidig dövhet.
- Den benförankrade hörapparaten (BAHA) appliceras på en hudgenomförande titanskruv som förankrats i skallbenet genom ett enkelt och säkert kirurgiskt ingrepp.
- Implanterbara benledningshörapparater har fördelen att fungera med intakt hud, vilket sannolikt kommer att minska hudkomplikationerna som är associerade med BAHA.
- Läkare och audionomer bör ha ett nära samarbete kliniskt och vetenskapligt för att kunna erbjuda patienten individuell och vetenskapligt grundad hörselrehabilitering.

applicera den på ett elastiskt band som trycker hörapparaten mot huden bakom örat. På det sättet kan audionomen som provar ut hörhjälpmedlet, och patienten, få en rimlig uppfattning om hur BAHA kommer att fungera på en benförankrad titanskruv.

Medfödda missbildningar av ytteröra, hörselgång och mellanöra leder oftast till ett ledningshinder där hörselnäckans funktion är intakt. Vid bilaterala ledningshinder hos barn anpassas BAHA på band så snart det är möjligt. De erhåller då en BAHA bakom varje öra. Barn med ensidiga ledningshinder har en större risk för sämre talutveckling och inlärningsproblem i skolan jämfört med barn med bilaterala ledningshinder eller normalhörande barn [8, 9]. Det är dock inte klarlagt att ett ensidigt hörhjälpmedel minskar denna risk [10]. Även barn med ensidiga ledningshinder anpassas med BAHA på band så snart det är möjligt. BAHA applicerad på en implanterad titanskruv ger bättre ljudtransmission till hörselnäcken [11, 12]. Vid ungefär 3-4 års ålder är det lämpligt att operera in en titanskruv för BAHA hos barn då skallbenet blivit tjockare och hårdare [13].

Allt sedan introduktionen av BAHA har ett ofrånkomligt problem varit hudgenomföringen. Ett hål i huden innebär en defekt av hudens skyddande funktion. Det har i många studier visats att komplikationer i form av inflammation och infektion runt skruven inte har gått att undvika på alla patienter (Figur 2A). Holgers skala 0-4 [14, 15] har varit till stor nytta för att jämföra graden av hudkomplikation och på så sätt kunna jämföra olika studieresultat. Resultaten i studierna har varierat mellan 5 och 25 procent hudkomplikationer som krävt en medicinsk åtgärd; här refereras till två av de viktigaste studierna [16, 17]. En annan komplikation är risken att skruven någon gång lossnar av olika anledningar. Även här varierar resultaten men ligger i genomsnitt på cirka 15 procent [18-20]. Generellt förloras mer skruvar hos barn än hos vuxna på grund av barnens tunnare och mjukare skallben. För att undvika komplikationer på grund av hudgenomföringen startade redan under 1990-talet arbetet med en implanterbar benledningshörapparat där huden lämnades intakt.

IMPLANTERBAR BENLEDNINGSHÖRAPPARAT

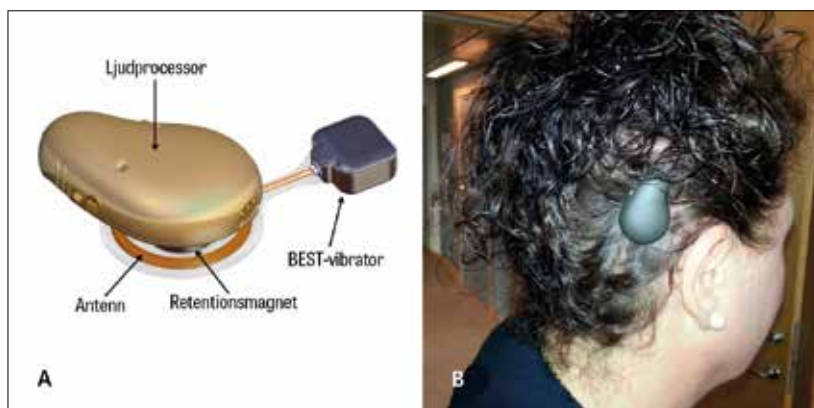
Professor Stefan Stenfelt (institutionen för biomedicinska och kliniska vetenskaper, Linköpings universitet) och professor Bo Håkansson (Chalmers tekniska högskola, Göteborg) är två av världens ledande forskare inom benledningsfysiologi. Dessa forskare och Richard L. Goode (Stanford University, Kalifornien, USA) publicerade de första artiklarna där intresset för en implanterbar benledningshörapparat och förutsättningarna för ett sådant hjälpmedel studerades [21, 22]. Ett av de viktigaste fynden var att ljudöverföringen via skallbenet blev 5-10 dB effektivare om man placerade vibratoren närmare hörselnäcken än den vanliga BAHA-positionen cirka 55 mm bakom den benigna hörselgångsmynningen. Senare studier bekräftade fynden både med kadavermätningar och på levande människor [23, 24]. Detta fynd är väsentligt då ljudenergin från en utanpåliggande enhet (se nedan) ska överföras genom huden med radiovågor till en enhet innanför huden, varpå cirka 10 dB förloras. Genom att placera vibratoren nära hörselnäcken kan denna för-



Figur 1. Två olika typer av benförankrad hörapparat (BAHA). Publiceras med tillåtelse av Cochlear, respektive Oticon Medical.



Figur 2. En vecka postoperativt titanimplantat utan reduktion av mjukvävnad (A). Hudinflammation runt titanimplantat (B).



Figur 3. BCI (bone conduction implant) med huvudsakliga ingående komponenter (A). Första patienten som erhöll BCI. Här med ljudprocessorn strax bakom och ovan örat (B).

lust vinnas tillbaka. Bo Håkansson utvecklade en ny typ av benledningsvibrator, BEST (balanced electromagnetic separation transducer) [25], som var starkare än den tidigare BAHA-vibratoren både i det lågfrekventa och i det högfrekventa tonområdet trots att storleken var mindre. Med olika resultatfokus genomfördes in vitro-studier, kadaverstudier och studier på djur, och kunskapen från dessa ledde fram till BCI, (bone conduction implant), Figur 3A [26-33].

BCI

I december 2012 opererades den första patienten med BCI [34] (Figur 3B). Ytterligare 15 patienter har efter det fått BCI inopererat. Studien löper över fem år med publicerade resultat efter sex månader och ett år [35, 36] samt efter tre år [37]. BCI består av en inopererad del och en yttre del som fäster mot den inopererade delen med magnetisk kraft. Den inopererade delen kal-

las för »bridging bone conductor« och består i sin tur av en BEST-vibrator och en antenn med en central retentionsmagnet. BEST är försänkt i en utborrad recess mätande 14 × 16 mm, och genom att spänna ned BEST mot benet med en titantråd överförs vibrationerna till skallbenet effektivt. Den yttre delen är ljudprocessorn och består av batteri, mikrofon och en avancerad digital ljudenhet. Kirurgin som krävs vid implantation av BCI är enkel och säker. Ingreppet tar ungefär 1 timme och görs i generell anestesi. Hörselresultaten med BCI är samma eller bättre än med BAHA på elastiskt band. Hörseln bedöms genom vanlig tonaudiometri, men även med olika test för att bedöma hur tal uppfattas, både i tyst och bullrig miljö. Olika livskvalitetsformulär har använts för att få en uppfattning om patientens subjektiva upplevelse av att använda BCI. En studie har jämfört BCI-patienters hörselresultat med en köns-, ålders- och hörselmatchad grupp BAHA-patienter, och resultaten är jämförbara [38].

BCI har legat till grund för en ny kommersiell benledningshörapparat som är under utveckling.

Andra implanterbara benledningshörapparater

På marknaden finns i dag flera implanterbara benledningshörapparater. De uppdelas i »skin-drive«, där vibratoren ligger på utsidan och överför ljudvibrationer genom hud och mjukvävnad till skallbenet, och »direct-drive« där vibratoren ligger an direkt mot skallbenet. Båda lösningarna är transkutana, det vill säga huden är intakt, men den stora skillnaden ligger i hur ljudet överförs till skallbenet. Fakta om de olika lösningarna finns publicerade i en artikel skriven av Sabine Reinfeldt, Chalmers [39]. Här beskrivs »direct-drive«-lösningar då författaren till denna artikel bedömer att dessa kommer dominera marknaden framöver.

Bonebridge är en transkutan »direct-drive«-benledningshörapparat som förankras i benet bakom örat med två skruvar. Till dags dato är Bonebridge den enda i sitt slag på marknaden (Figur 4). Andra hörapparatföretag arbetar med att utveckla nya transkutana »direct drive«-lösningar som inom en snar framtid kommer att finnas på marknaden. Olika företag har valt olika lösningar vad gäller vibrator, fastsättning i benet, ljudteknik m m, vilket kommer ge en bredd av denna typ av hörapparater till behövande patienter. En nackdel med de implanterbara alternativen jämfört med BAHA är att magneter förekommer i mer eller mindre omfattning. Vid MRT-undersökningar kommer bilden av närliggande organ (typiskt inom 6-8 cm), såsom en del av hjärnan, att förvrängas. Viss risk av påverkan på implantatet i form av minskad prestanda och en försvagning av magneten som håller den utanpåliggande enheten föreligger [40]. De olika företagen arbetar på olika sätt med att begränsa påverkan på MRT-bilden.

VILKEN LÖSNING SKA PATIENTEN ERBJUDAS?

Vid varje konsultation där det finns indikation för benledningshörapparat är samarbetet mellan audiolog och läkare viktigt för att kunna ge patienten noggrann och fullständig information om befintliga hörsellösningar. Man bör om möjligt låta patienten prova både vanlig hörapparat och BAHA på band. Om patienten föredrar den benledda lösningen informeras denne om de olika hörhjälpmedel som finns, perkutan



Figur 4. Transkutan »direct-drive« benledningshörapparat. Publiceras med tillåtelse av Med El.

eller transkutan benledningshörapparat, fördelar och nackdelar samt vad det kirurgiska ingreppet innebär. Informationen är omfattande och ökar också med det ökande utbudet av hörsellösningar. Det är för audiologer och läkare mycket viktigt att med vetenskapliga metoder bidra till förståelsen av de nya benledningshörapparaterna och sprida forskningsresultat för att kunna erbjuda patienten individuell och vetenskapligt grundad hörselrehabilitering. ○

- Potentiella bindningar eller jävsförhållanden: Författaren har under de senaste åren stundtals arbetat med konsultuppdrag för Oticon Medical.

Citera som: *Läkartidningen. 2020;117:20030*

SUMMARY

Bone conduction hearing devices - Hearing through the skull bone

Bone conduction hearing devices are indicated when patients suffer from conductive hearing loss or mixed hearing loss. Bone conduction hearing devices are also an alternative for patients with single sided deafness. Since the late 1980s the Bone Anchored Hearing Aid (BAHA) has dominated hearing rehabilitation for patients with conductive and mixed hearing losses, where a conventional hearing aid is not an option or is a worse hearing solution for the patient. The BAHA is attached to a skin penetrating titanium screw and abutment, which has been anchored in the skull bone approximately 55 mm behind the ear. The surgical procedure is simple and safe. Due to the skin penetrating solution, complications such as skin inflammations and infections are associated with the BAHA. Implantable bone conduction devices are gaining interest and have the advantage of functioning under intact skin, which probably will decrease the number of skin complications compared to the BAHA solution.

REFERENSER

- von Békésy G. Experiments in hearing (övers: Wever EG). New York: McGraw-Hill; 1960.
- Bränemark PI, Hansson BO, Adell R, et al. Osseointegrated implants in the treatment of the edentulous jaw. Experience from a 10-year period. *Scand J Plast Reconstr Surg Suppl.* 1977;16:1-132.
- Tjellström A, Lindström J, Hallén O, et al. Osseointegrated titanium implants in the temporal bone. A clinical study on bone-anchored hearing aids. *Am J Otol.* 1981;2(4):304-10.
- Håkansson B, Tjellström A, Rosenhall U, et al. The bone-anchored hearing aid. Principal design and a psychoacoustical evaluation. *Acta Otolaryngol.* 1985;100(3-4):229-39.
- Tjellström A, Rosenhall U, Lindström J, et al. Five-year experience with skin-penetrating bone-anchored implants in the temporal bone. *Acta Otolaryngol.* 1983;95(5-6):568-75.
- Hultcrantz M. Outcome of the bone-anchored hearing aid procedure without skin thinning: a prospective clinical trial. *Otol Neurotol.* 2011;32(7):1134-9.
- Hultcrantz M, Lanis A. A five-year follow-up on the osseointegration of bone-anchored hearing device implantation without tissue reduction. *Otol Neurotol.* 2014;35(8):1480-5.
- Jensen DR, Grames LM, Lieu JE. Effects of aural atresia on speech development and learning: retrospective analysis from a multidisciplinary craniofacial clinic. *JAMA Otolaryngol Head Neck Surg.* 2013;139(8):797-802.
- Lieu JE, Tye-Murray N, Karzon RK, et al. Unilateral hearing loss is associated with worse speech-language scores in children. *Pediatrics.* 2010;125(6):e1348-55.
- van Hövell Tot Westerflier CVA, van Heteren JAA, Breugem CC, et al. Impact of unilateral congenital aural atresia on academic performance: a systematic review. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol.* 2018;114:175-9.
- Håkansson B, Tjellström A, Rosenhall U. Hearing thresholds with direct bone conduction versus conventional bone conduction. *Scand Audiol.* 1984;13(1):3-13.
- Pittman AL. Bone conduction amplification in children: stimulation via a percutaneous abutment versus a transcutaneous softband. *Ear Hear.* 2019;40(6):1307-15.
- Snik A, Leijendeckers J, Hol M, et al. The bone-anchored hearing aid for children: recent developments. *Int J Audiol.* 2008;47(9):554-9.
- Holgers KM, Tjellström A, Bjursten LM, et al. Soft tissue reactions around percutaneous implants: a clinical study on skin-penetrating titanium implants used for bone-anchored auricular prostheses. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 1987;2(1):35-9.
- Holgers KM, Tjellström A, Bjursten LM, et al. Soft tissue reactions around percutaneous implants: a clinical study of soft tissue conditions around skin-penetrating titanium implants for bone-anchored hearing aids. *Am J Otol.* 1988;9(1):56-9.
- de Wolf MJ, Hol MK, Huygen PL, et al. Clinical outcome of the simplified surgical technique for BAHA implantation. *Otol Neurotol.* 2008;29(8):1100-8.
- Hobson JC, Roper AJ, Andrew R, et al. Complications of bone-anchored hearing aid implantation. *J Laryngol Otol.* 2010;124(2):132-6.
- Dun CA, Faber HT, de Wolf MJ, et al. An overview of different systems: the bone-anchored hearing aid. *Adv Otorhinolaryngol.* 2011;71:22-31.
- Reyes RA, Tjellström A, Granström G. Evaluation of implant losses and skin reactions around extraoral bone-anchored implants: a 0- to 8-year follow-up. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 2000;122(2):272-6.
- Wallberg E, Granström G, Tjellström A, et al. Implant survival rate in bone-anchored hearing aid users: long-term results. *J Laryngol Otol.* 2011;125(11):1131-5.
- Stenfelt S, Goode RL. Transmission properties of bone conducted sound: measurements in cadaver heads. *J Acoust Soc Am.* 2005;118(4):2373-91.
- Stenfelt S, Håkansson B, Tjellström A. Vibration characteristics of bone conducted sound in vitro. *J Acoust Soc Am.* 2000;107(1):422-31.
- Eeg-Olofsson M, Stenfelt S, Tjellström A, et al. Transmission of bone-conducted sound in the human skull measured by cochlear vibrations. *Int J Audiol.* 2008;47(12):761-9.
- Reinfeldt S, Håkansson B, Taghavi H, et al. Bone conduction hearing sensitivity in normal-hearing subjects: transcutaneous stimulation at BAHA vs BCI position. *Int J Audiol.* 2014;53(6):360-9.
- Håkansson BE. The balanced electromagnetic separation transducer a new bone conduction transducer. *J Acoust Soc Am.* 2003;113(2):818-25.
- Eeg-Olofsson M, Lith A, Håkansson B, et al. Evaluation of bone tissue formation in a flat surface attachment of a bone conduction implant: a pilot study in a sheep model. *Audiol Neurotol Extra.* 2014;4(3):62-76.
- Eeg-Olofsson M, Håkansson B, Taghavi H, et al. Correlation between the velocity of the cochlear promontory and hearing perception [poster 21]. *Third International Symposium on Bone Conduction Hearing-Craniofacial*
- Osseointegration, Sarasota (FL), 23-26 mar 2011.
- Håkansson B, Eeg-Olofsson M, Reinfeldt S, et al. Percutaneous versus transcutaneous bone conduction implant system: a feasibility study on a cadaver head. *Otol Neurotol.* 2008;29(8):1132-9.
- Håkansson B, Reinfeldt S, Eeg-Olofsson M, et al. A novel bone conduction implant (BCI): engineering aspects and pre-clinical studies. *Int J Audiol.* 2010;49(3):203-15.
- Taghavi H, Håkansson B, Reinfeldt S, et al. Technical design of a new bone conduction implant (BCI) system. *Int J Audiol.* 2015;54(10):736-44.
- Taghavi H, Håkansson B, Eeg-Olofsson M, et al. A vibration investigation of a flat surface contact to skull bone for direct bone conduction transmission in sheep skulls in vivo. *Otol Neurotol.* 2013;34(4):690-8.
- Taghavi H, Håkansson B, Reinfeldt S. Analysis and design of RF power and data link using amplitude modulation of Class-E for a novel bone conduction implant. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2012;59(11):3050-9.
- Taghavi H, Håkansson B, Reinfeldt S, et al. Feedback analysis in percutaneous bone-conduction device and bone-conduction implant on a dry cranium. *Otol Neurotol.* 2012;33(3):413-20.
- Eeg-Olofsson M, Håkansson B, Reinfeldt S, et al. The bone conduction implant - first implantation, surgical and audiological aspects. *Otol Neurotol.* 2014;35(4):679-85.
- Håkansson B, Reinfeldt S, Persson AC, et al. The bone conduction implant - a review and 1-year follow-up. *Int J Audiol.* 2019;58(12):945-55.
- Reinfeldt S, Håkansson B, Taghavi H, et al. The bone conduction implant: clinical results of the first six patients. *Int J Audiol.* 2015;54(6):408-16.
- Persson AC, Reinfeldt S, Håkansson B, et al. Three-year follow-up with the bone conduction implant. *Audiol Neurotol.* Epub 8 apr 2020. doi: 10.1159/000506588.
- Rigato C, Reinfeldt S, Håkansson B, et al. Audiometric comparison between the first patients with the transcutaneous bone conduction implant and matched percutaneous bone anchored hearing device users. *Otol Neurotol.* 2016;37(9):1381-7.
- Reinfeldt S, Håkansson B, Taghavi H, et al. New developments in bone-conduction hearing implants: a review. *Med Devices (Auckl).* 2015;8:79-93.
- Fredén Jansson KJ, Håkansson B, Rigato C, et al. Robustness and lifetime of the bone conduction implant - a pilot study. *Med Devices (Auckl).* 2019;12:89-100.